



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

반전된 분할 링 공진기 배열과
YIG 박막으로 구성된 평면 혼성 구조의
광자-마그논 결합

Photon-Magnon coupling
in planar-geometry hybrid structures of
inverted split ring resonator arrays/YIG
film

2018년 08월

서울대학교 대학원

공과대학 재료공학부

장 승 훈

Photon-Magnon coupling
in planar-geometry hybrid structures of
inverted split ring resonator arrays/YIG
film

지도 교수 김 상 국

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2018년 07월

서울대학교 대학원
공과대학 재료공학부
장 승 훈

장승훈의 공학석사 학위논문을 인준함
2018년 07월

위 원 장 _____ 오 규 환

부위원장 _____ 김 상 국

위 원 _____ 이 명 규

(인)
(인)
(인)

초 록

본 연구는 마이크로 스트립 라인 기술에 2차원 평면 형상의 Inverted Split Ring Resonator 1차원 배열을 적용하여 YIG와 하이브리드 결합 구조를 통한 광자-마그논 결합을 연구하였다. ISRR 1차원 배열의 광자 모드와 YIG의 마그논 모드 사이에 강한 anti-crossing 상호작용이 다중으로 발생함을 실험적으로 관찰하고 밝혀냈다. 단일 ISRR과 달리 ISRR 1차원 배열의 주기적 성질에 의하여 발생하는 다중 공진과 약한 세기의 마그논 모드가 anti-crossing 효과를 통해 신호의 강한 증폭 및 강한 결합이 일어나게 되는 결과를 얻었다. 이로부터 얻은 결과를 결합된 조화 진동자 모델을 통하여 결합 강도를 정량적으로 측정하고 해석함으로써 다중 결합 현상을 밝혀냈다. ISRR 1차원 배열을 통해 넓은 주파수 영역에서 흡수가 강하게 다중으로 일어나기 때문에 광자-마그논 상호작용이 일어나는 영역 역시 매우 넓어지게 된다. 이는 고주파로 주파수 가용 대역을 넓히고 있는 정보 통신 분야의 수요를 충족하고, 일관된 양자 효과를 넓은 주파수 대역에 적용함으로써 효율적인 정보 전달의 가능성을 제시하였다.

주요어 : ISRR 배열, YIG, 광자, FMR, 광자-마그논 결합

학 번 : 2016-20822

목 차

초 록.....	i
목 차.....	ii
그림목차.....	iii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 연구 배경.....	4
2.1 Split Ring Resonator (SRR) 와 Inverted Split Ring Resonator (ISRR)	4
2.2 강자성 공명 (Ferromagnetic Resonance)	10
2.3 결합된 조화 진동자 모델 (Coupled Harmonic oscillator model)	18
제 3 장 시편 제작 및 측정.....	24
3.1 시편 구조 설계.....	24
3.2 광식각 공정 및 VNA 측정	28
제 4 장 전산모사를 이용한 ISRR 공진 특성.....	32
4.1 ISRR의 변 길이 따른 공진 효과	32
4.2 ISRR의 분할 갭 너비에 따른 공진 효과	34
4.3 ISRR의 분할 갭 방향에 따른 공진 효과	36
4.4 2개의 ISRR 사이 거리 변화에 따른 공진 효과.....	38
4.5 ISRR 개수에 따른 공진 효과	40
제 5 장 ISRR 1차원 배열 광자 모드와 YIG 마그논 모드 결합	42
5.1 2개의 ISRR 1차원 배열 광자 모드와 YIG 마그논 모드 결합	42
5.2 3개의 ISRR 1차원 배열 광자 모드와 YIG 마그논 모드 결합	51
5.3 4개의 ISRR 1차원 배열 광자 모드와 YIG 마그논 모드 결합	58
5.4 혼성 구조에서 ISRR 1차원 배열과 결합상수 k 관계	64
제 6 장 결 론	66
참고문헌.....	67

그림 목차

그림 1. SRR 구조 모식도	8
그림 2. SRR과 ISRR의 구조 및 공진 특성 비교	9
그림 3. LLG 방정식에 의해 표현되는 자화 벡터의 세차운동의 모식도	16
그림 4. YIG의 결정구조	17
그림 5. 결합된 조화진동자 모델	23
그림 6. 마이크로 스트립 라인에 ISRR 1차원 배열을 적용한 설계 모식도	26
그림 7. 기판의 전면, 후면 및 기판 3중 구조 모식도	27
그림 8. 샘플 제작을 위한 광식각 공정 순서도	30
그림 9. 2port-Vector Network Analyzer 측정 모식도	31
그림 10. ISRR의 길이 변화에 따른 공진주파수 변화	33
그림 11. ISRR의 분할된 gap에 의한 공진주파수 특성 변화 ...	35
그림 12. ISRR gap 방향에 따른 공진주파수 특성 변화	37
그림 13. 2개 ISRR 사이의 거리를 변화에 따른 주파수와 $ S_{21} $ 그래프	39
그림 14. ISRR 배열에 대한 전산모사와 실험 결과	41
그림 15. 2개의 ISRR 1차원 배열에서의 광자 모드	46
그림 16. 주파수와 $ S_{21} $ 관계에서 YIG의	

마그논 모드(FMR 모드)	47
그림 17. 2개 ISRR 1차원 배열-YIG 하이브리드 구조에 대한	
$ S_{21} $ 그래프 및 스펙트럼	48
그림 18. 2개의 ISRR 1차원 배열의 각 공진주파수 부근에서	
광자와 마그논 결합에 대한 주파수- $ S_{21} $ 그래프....	49
그림 19. 2개 ISRR 1차원 배열의 공진주파수 부근에서	
anti-crossing 효과 및 결합강도.....	50
그림 20. 3개 ISRR 1차원 배열-YIG 하이브리드 구조에 대한	
$ S_{21} $ 그래프 및 스펙트럼	54
그림 21. 3개의 ISRR 1차원 배열의 각 공진주파수 부근에서	
광자와 마그논 결합에 대한 주파수- $ S_{21} $ 그래프	55
그림 22. 3개 ISRR 1차원 배열의 공진주파수 부근에서	
anti-crossing 효과 및 결합강도.....	56
그림 23. 4개 ISRR 1차원 배열-YIG 하이브리드 구조에 대한	
$ S_{21} $ 그래프 및 스펙트럼	61
그림 24. 4개의 ISRR 1차원 배열의 각 공진주파수 부근에서	
광자와 마그논 결합에 대한 주파수- $ S_{21} $ 그래프	62
그림 25. 4개 ISRR 1차원 배열의 공진주파수 부근에서	
anti-crossing 효과 및 결합강도.....	63
그림 26. 각 ISRR 1차원 배열과 YIG사이의	

주파수-결합상수 k 에 대한 그래프	65
-----------------------------	----

제 1 장

서 론

보존 특성을 가지면서 일관된 정보를 교환하는 것은 양자 정보 전달 시스템에서 필수적이다. 이 시스템을 실현시키기 위한 전기 역학과 자화 동역학 사이의 강력한 결합은 통신 과학 및 기술 분야에서 오랜 관심 주제였다[1]. 두 영역의 결합은 빛과 물질로 이루어진 두 개의 하위 시스템 간 결합 강도로 특성화 되어지고, 공진 시스템 적용으로 평균 에너지 손실보다 커진다[2-4]. 빛의 전기 역학과 물질 역학의 결합으로 준입자 형태인 폴라리톤이 다양하게 발생하게 되며, 이 중 스핀의 집단적 거동으로 발생하는 마그논과 광자의 결합은 양자 정보 기술을 위한 핵심 연구로 진행되고 있다[5]. 양자 정보 전달을 달성하기 위해 두 하위 시스템의 강력한 결합이 요구 되는데, 단일 스핀과 광자 결합은 요구하는 수준의 세기에 도달하지 못한다. 따라서 스핀들의 집단적 거동을 통한 광자와의 효과적인 결합 강도 달성이 필요하다. 이와 같은 요구 조건을 충족하기 위해 강자성과 페리자성 물질이 해당 연구에 사용 되어지고 있다. 강자성과 페리자성 물질은 스핀 간 강한 상호작용으로 스핀의 집단적 거동을 발생하는데 적합한 특성을 가

진다[6, 7]. 그 중 페리자성인 Yttrium-Iron-Garnet(YIG)은 높은 스핀 밀도와 낮은 감쇠 상수를 가지는 특성으로 광자-마그논 결합의 핵심 재료로 사용 되고있다. 또한, cavity 양자 전기 역학의 발달로 YIG를 고품질 마이크로파 cavity에 삽입하여 강한 결합을 쉽게 달성할 수 있게 되었다[8]. 이로 인해 광자-마그논 결합에 대한 기존 연구들은 3차원의 cavity와 YIG 구나 박막과 같이 3차원 구조의 재료를 주로 사용하였다[9, 10]. 그러나 이러한 연구들은 3차원 구조 사용으로 인해 기존 정보 소자가 가지는 2차원 CMOS 플랫폼과 호환성이 떨어진다는 문제를 가지고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 최근 전자기파를 구동하는 소스로 마이크로파 cavity 대신 마이크로 스트립 라인 기술이 대안으로 제시되고 있다[11, 12]. 마이크로 스트립 라인은 2차원 형태의 공진기 구현이 가능할 뿐만 아니라 자기장으로 조절할 수 있는 공진 특성을 가지므로 기존 cavity-YIG 구의 크기 의존성에 대한 제약을 극복할 수 있다[13].

본 연구는 마이크로 스트립 라인 기술에 2차원 평면 형상의 Inverted Split Ring Resonator 1차원 배열을 적용하여 YIG와 하이브리드 결합 구조를 통한 광자-마그논 결합을 연구하였다. 2포트-Vector Network Analyzer를 이용하여 ISRR 1차원 배열의 광자 모드와 YIG의 마그논 모드 사이에 강한 anti-crossing 상호작

용이 다중으로 발생함을 실험적으로 관찰하고 밝혀냈다. 주기적으로 금속이나 유전체 같은 구조를 반복하게 되면 개별 매체와는 다른 특이한 현상이 발생하게 되는데, 특정주파수의 전자기파를 선택적으로 투과, 제어하는 등 다양한 전자기적 특성이 나타난다 [14, 15]. 단일 ISRR과 달리 ISRR 1차원 배열의 주기적 성질에 의하여 발생하는 다중 공진과 약한 세기의 마그논 모드가 anti-crossing 효과를 통해 신호의 강한 증폭 및 강한 결합이 일어나게 되는 결과를 얻었다. 이로부터 얻은 결과를 결합된 조화 진동자 모델을 통하여 결합 강도를 정량적으로 측정하고 해석함으로써 다중 결합 현상을 밝혀냈다. ISRR 1차원 배열을 통해 넓은 주파수 영역에서 흡수가 강하게 다중으로 일어나기 때문에 광자-마그논 상호작용이 일어나는 영역 역시 매우 넓어지게 된다. 이는 고주파로 주파수 가용 대역을 넓히고 있는 정보 통신 분야에 일관된 양자 효과를 넓은 주파수 대역에 적용하여 효율적인 정보 전달의 가능성을 제시하였다.

제 2 장

연 구 배 경

2.1 Split Ring Resonator(SRR)와 Inverted Split Ring Resonator(ISRR)

전송선 기술(Transmission line)은 마이크로 스트립 라인(Microstrip line)이나 동일 평면 도파관(Coplanar waveguide)에 반응성 요소들을 탑재하여 인공적으로 메타물질의 특성을 구현하는데 사용되고 있다[16, 17]. 부하되는 요소인 Split Ring Resonator와 Inverted Split Ring Resonator는 전송선 기술에 적용되어 하나의 공진기를 이룬다[18-20]. 두 경우 모두 수-파장 크기를 갖는 공진기 설계를 통해 소형의 조밀한 마이크로파 소자 구현을 가능하게 한다. SRR은 Pendry에 의해 한 쌍의 분리된 원형 링 공진기로써 제안 되었다[21]. 유효 음의 투자율을 갖는 메타물질 구현 가능성 때문에 전자기파와 마이크로파 공학에서 활발히 연구가 진행 되었다[22, 23]. 이후 Smith에 의해 음의 유전율과 투자율을 모두 갖는 Left-Handed Metamaterials인 SRR이 고안 되었다. SRR의 구조는 <그림 1>과 같이 금속의 링과 분할된

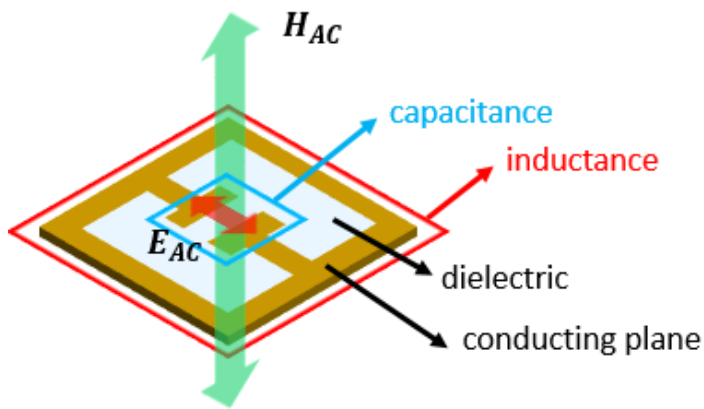
갭으로 이루어져 있다[24]. 이 때 SRR이 존재하는 면의 수직축 방향으로 시간에 따라 변하는 자기장을 인가하게 되면 렌츠의 법칙에 의해 인가 자기장의 반대 방향으로 유도 자기장이 형성되며 페르데이 법칙을 따르는 방향으로 금속 링에 전류가 흐르게 된다. 이 때 외부 자기장에 대한 금속 링의 반응은 자기 쌍극자 모멘트가 나타나지만 공진은 발생하지 않는다. 공진을 일으키고 자기적 반응을 증가시키기 위해 분할된 갭이 구조에 적용된다. 갭에 의해 전하가 축적되고 전기적 분극이 형성된다. 즉, SRR은 금속 링과 분할된 갭에 의해 각각 인덕턴스와 캐패시턴스 특성이 나타나게 되고, 하나의 LC 회로로써 주파수 $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ 관계를 갖는 공진 현상이 발생한다[25].

SRR에 음영이 반대인 상보적 구조를 갖는 ISRR은 Falcone에 의해 처음으로 연구 되어졌다[26]. Duality principle에 따라 ISRR은 기하학적 구조뿐만 아니라 성질 역시 SRR과 반대로 나타나게 된다. <그림 2>와 같이 SRR의 유전체 부분은 ISRR의 금속 부분으로 대체되고, SRR의 금속 부분은 ISRR의 유전체 부분으로 대체된다. 이로 인해 링은 SRR에서 인덕턴스 특성을 갖지만, ISRR에서는 캐패시턴의 특성을 나타낸다. 반면 분할된 갭의 경우 캐패시터의 역할은 SRR에서 수행하지만, ISRR의 경우 인덕터로써 작용하게 된다[27-29]. 공진을 일으키는 방법의 경우 축 방향으

로 인가되는 자기장에 의해 여기 되는 SRR과 달리 ISRR은 시간에 따라 변하는 전기장을 수직으로 인가하여 여기 시킨다. 이로 인해 SRR은 음의 투자율을 갖는 자기 쌍극자으로써 거동하지만, ISRR은 음의 유전율을 가지며 전기 쌍극자으로써 거동하게 된다. 이와 같은 특성으로 인해 각 공진기들은 서로 다른 방식으로 전송선 기술과 결합되어 설계 되어진다. SRR 공진기의 경우 축 자기장에 의해 여기 되므로 상부에 동일 평면 도파관(Coplanar waveguide), 하부 접지면에 SRR을 위치시킨 설계를 하거나 상부 마이크로 스트립 라인(Micro stripline)에 SRR을 같은 평면상에 인접 시킴으로써 구동을 극대화 한다[20, 30]. 반면 ISRR의 경우 상부 마이크로 스트립 라인의 바로 수직 하단 접지면에 ISRR을 식각하여, 전기장 인가를 극대화하는 구조로 설계한다. 둘의 구조적 크기가 같을 경우 그림과 같이 거의 동일한 공진주파수가 형성된다. 그러나 표면 전류 밀도가 높은 특성으로 인해 상대적으로 ISRR이 큰 이득과 넓은 대역폭을 가지게 된다<그림 2>. 소형의 평면형 공진기를 구성할 수 있는 공통점과 상반된 전기적, 자기적 특성을 이용하여 필터, 커플러, 소형 위상 변환기와 같이 손실이 적고 공진 특성이 좋은 마이크로파 소자에 응용되고 있다[31-33].

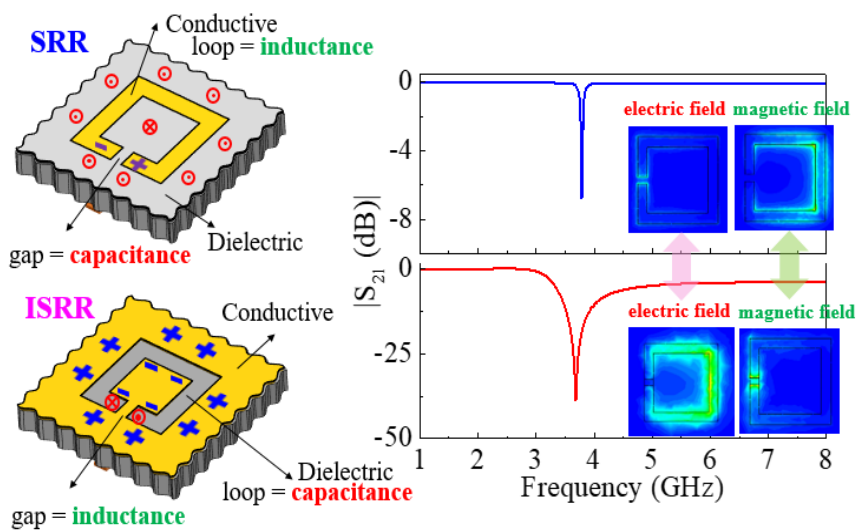
본 연구는 ISRR의 넓은 대역폭과 높은 이득(에너지 흡수 피

크)으로 SRR 비해 마그논 모드와 강한 결합이 발생한다는 연구적 사실을 기반으로[34], 전송선 기술에 ISRR 1차원 배열을 적용하여 소형의 조밀한 2차원 형상의 공진기를 설계하고 마그논 모드와 다중의 강한 결합을 발생시켰다.



excitation : **out of plane** H_{AC} + **in plane** E_{AC}

<그림1> SRR 구조 모식도. 시간에 따라 변하는 수직 자기장의 인가로 ISRR의 전도성 루프(사각 링)에 전류가 유도되고 인덕턴스 특성이 나타난다. 갭의 존재로 인해 전하가 축적되어 캐패시턴스 특성이 발생함으로써 하나의 LC회로 공진기로 작동하게 된다.



<그림2> [참고문헌 34] SRR과 ISRR의 구조 및 공진 특성 비교.

동일한 기하학적 크기를 가질 때 거의 동일한 공진주파수 발생.

2.2 강자성 공명(Ferromagnetic resonance)

광자와 마그논 결합은 외부 자기장이 존재하는 상태에서 ferrimagnet과 ferromagnetic 물질의 스핀들과 광자 사이의 상호 작용이 연구되어 왔다. 마그논은 자성 물질에서 전자의 스핀이 집단적으로 거동하여 발생 되어지는 스핀파의 준입자 상태를 의미한다. 강자성 물질의 스핀에 대한 자기장의 효과는 Lev Landau and Evgeny Lifshitz에 의해 처음 연구되었다[35].

<그림 3>과 같이 DC 자기장 H 가 강자성 재료에 인가 되어질 때, 토크가 작용하여 자화 벡터 M 은 자기장 주위에서 세차운동을 하게 된다[36]. 만약 세차운동 주파수와 동일한 주파수의 RF 자기장이 수직으로 인가된다면, 공진 흡수가 발생하는데 이를 강자성 공명이라고 한다. 자화는 RF 자기장 주파수와 평형 상태가 되는 방향을 중심으로 세차운동하게 된다.

내부 자기장이 외부 자기장과 같고, 손실이 없다고 가정했을 때 자기장에서 자화의 동적 거동은 다음과 같이 기술된다.

$$\gamma \frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{M} \times \vec{H} \quad (\text{II.1})$$

여기서 t 는 시간, γ 은 자기 회전 비율로 $|\gamma| = g\mu_B/\hbar$ 을 나타낸다. G 는 분광 분할 계수(g -factor)이며 μ_B 은 보어 마그네톤으로 자기 모멘트의 크기를 나타내는 기본 단위로 정의된다. \vec{M} 은 각주파수를 가지고 원형 원추 표면에서 그림과 같이 세차운동한다. 이를 라모 주파수 $\omega_0 = \gamma H_r$ 로 정의하며 세차운동의 각의 크기와 관계없이 일정한 주파수로 회전하는 것을 의미한다. AC 자기장이 $h(t) = h_0 \exp(i\omega t)$ 에서 $h_0 \ll H$ 이고 $\omega = \omega_0$ 주파수를 가지며 DC 자기장 H 에 수직이라면 공명이 발생한다. 공명의 조건을 다음과 같이 나타낸다.

$$\omega = \gamma H_r \quad (\text{II}, 2)$$

위 식은 구형 시편에서만 적용 가능하다. 일반적인 타원 측정 시편의 경우 반자장이 공명 조건에 포함되어야 한다. 타원형 시편에 대한 공명 조건은 다음과 같다.

$$\omega = \gamma \left[\{H_r + (N_x - N_z)4\pi M_s\} \{H_r + (N_y - N_z)4\pi M_s\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II}, 3)$$

여기서 $4\pi M_s$ 는 포화 자화를 의미한다. H_r 은 Z 방향으로 인가

된 자기장이고, N_x , N_y , N_z 은 반자화 인자이다. 반자화 인자는 $N_x + N_y + N_z = 1$ 을 만족한다. 상기 식은 일반적으로 Kittel 방정식으로 알려져 있다[37]. 상기 식에 박막을 타원체로 근사하여 생각하면, 자기장이 박막 평면에 수직으로 적용되는 경우와 박막 평면에 평행하게 적용되는 경우까지 감소하게 된다[38].

$$H_{r\perp} = \frac{\omega}{\gamma} + 4\pi M_s \quad (\text{II}, 4)$$

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_{r\parallel}(H_{r\parallel} + 4\pi M_s) \quad (\text{II}, 5)$$

여기서 $H_{r\perp}$, $H_{r\parallel}$ 은 수직일 때와 수평 배열일 때 각각의 공진 자기장을 의미한다. 만약 시편이 이방성을 가지게 되면 이방성 에너지는 Kittel 방정식에 포함되게 된다. 시편의 자기장은 유효 포화 자화에 의존하게 되고 단축 이방성 자기장의 영향이 포함 된다.

$$H_{r\perp} = \frac{\omega}{\gamma} + 4\pi M_{eff} \quad (\text{II}, 6)$$

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_{r\parallel}(H_{r\parallel} + 4\pi M_{eff}) \quad (\text{II}, 7)$$

따라서 Kittel 방정식의 포화 자화 값은 유효 자화 값으로 대체한다.

FMR 실험에서 시스템에 흡수된 에너지는 감쇠에 의해 일부 격자로 붕괴되어 이완 현상이 일어나게 된다[36]. FMR의 기본 방정식에는 감쇠 상수가 생략되어 있지만, 실제 강자성 시스템에서는 감쇠력이 항상 존재한다. 그러므로 자기 모멘트의 동적 거동을 정확하게 기술하기 위해서는 개별 스핀의 운동 방정식에 감쇠 항이 추가되어야 한다.

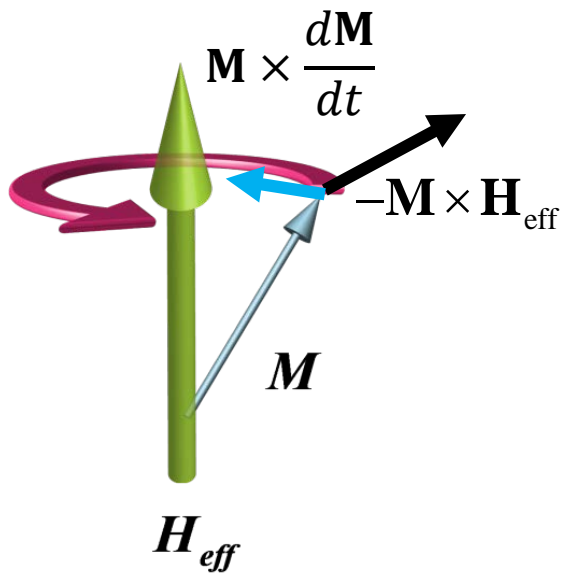
$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma(\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) + \frac{\alpha}{M_S} \left[\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right] \quad (\text{II}, 8)$$

길버트 감쇠 상수 α 는 역학적으로 마찰과 유사하게 자화의 세차 운동이 얼마나 빠르게 감쇠하여 외부 자기장 방향으로 배향하는지를 나타낸다. 위와 같이 자화의 세차운동과 감쇠토크를 이용하여 자화의 시간에 따른 동적 거동을 기술한 식을 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 운동 방정식이라 한다. 연속적인 구동 토크가 없으면 자화 세차운동의 크기는 감쇠로 인해 결국 유효 자화의 방향으로 배열된다. 세차운동 항은 자화 에너지 변화가 없지만, 다양한 원인에 의해 감쇠항으로부터 에너지가 손실된다. 자화의 세차운동을 유지하기 위해서 주파수 ω 로 진동하는 마이크로파의 자기장을

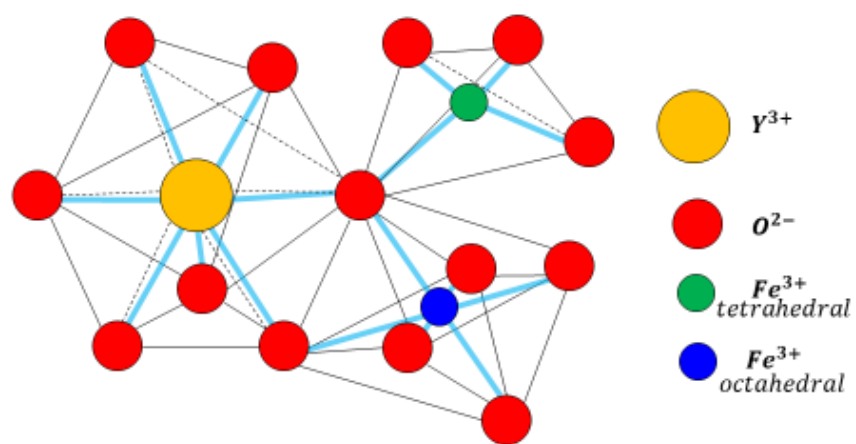
사용하여 연속적인 구동 토크를 가해 주어야 한다. 감쇠상수 α 가 1보다 매우 작을 때 강자성 공명 모드는 발생한다. 이러한 개별 스핀들이 집단적으로 거동하여 파수가 0이 될 때 스핀파가 발생하게 되고, 이것의 양자화된 입자 형태인 마그논이 여기 된다[5].

강한 광자와 마그논 결합을 실험적으로 관찰하기 위해서는 자성 재료가 높은 스핀 밀도와 낮은 감쇠상수를 가져야 한다. 이러한 요구조건을 매우 잘 충족하는 재료로 YIG(Yttrium Iron Garnet, $Y_3Fe_5O_{12}$)가 존재한다. YIG의 결정 구조는 <그림 4>과 같이 24개의 Y^{3+} , 40개의 Fe^{3+} , 96개의 O^{2-} 로 구성되어 있다. O^{2-} 이온은 Polyhedrons와 octahedron, tetrahedron 세 가지 유형을 형성한다[29]. Y^{3+} 이온은 dodecahedral 자리에 점유한다. Fe^{3+} 이온은 tetrahedral, octahedral 자리에 점유되는데, 최소에너지로 가기 위해 산소 이온의 2p 전자 1개가 이웃한 Fe^{3+} 양이온에 일시적으로 이동하여 Fe^{2+} 로 변하면서 교환력을 생산하게 된다[39]. 두 가지 다른 자리에 Fe^{3+} 이 점유하면서 스핀의 차이를 발생시키고, 자기적 거동을 나타낸다[40]. 각 단위정은 160개의 원자와 8개의 (sub unit cell) formula unit으로 구성 되어있다. YIG는 높은 품질 계수를 가지므로 마이크로파 필터와 공진기를 설계하는데 주로 사용 되어 왔다. 매우 낮은 감쇠상수($\sim 10^{-5}$)와 매우 높은 스핀 밀도($\sim 10^{27}m^{-3}$)로 광자와 마그논 결합 연구에 주로 사용되어져 왔다

[41, 42]. 따라서 본 연구에서는 YIG 박막을 마그논 여기 소스로 사용하였고, 여러 종류의 마그논 모드 중 FMR 모드를 이용하였다.



<그림 3> LLG 방정식에 의해 표현되는 자화 벡터의 세차운동의 모식도. DC 유효 자기장 중심으로 세차운동 및 자기장 방향으로 점차 감쇠하는 자화 거동의 모식도.



<그림 4> YIG의 결정구조

2.3 결합된 조화 진동자 모델 (Coupled harmonic oscillator model)

감쇠를 고려한 단순 조화 진동은 후의 법칙에 의한 힘과 마찰에 의한 감쇠 만을 고려한 것이다. 속도에 비례하는 마찰력까지 고려하여 다음과 같이 나타낸다.

$$F = ma = mx'' = -kx - bx' \quad (\text{II}, 9)$$

감쇠 상수 λ 와 ω_0 에 대한 식으로 표현하면 $b = 2\lambda m$, $k = m\omega_0^2$ 를 대입하면 다음과 같은 운동 방정식이 성립한다.

$$mx'' - m\omega_0^2 x - 2\lambda mx' = 0 \quad (\text{II}, 10)$$

진동하는 계의 위치를 시간에 따른 함수로 표현하면 다음과 같은 해의 형태로 표현할 수 있다.

$$x_i(t) = A \exp(i\omega t) \quad (\text{II}, 11)$$

A는 복소 진폭으로써 진동기의 진폭을 의미한다. 절대값은 진폭

과 동일하고 편각은 처음 위상에 상응한다.

광자와 마그논 결합은 단순 조화 진동과 달리 두 진동자가 연결된 모델로써 이를 설명하기 위해서 결합된 조화 진동자 모델을 적용하고 설명하였다. <그림 5>과 같이 광자 모드와 마그논 모드는 결합 상수로 연결된 2개의 진동자 형태로 모델링 할 수 있다. 여기서 두 개의 진동자인 발진기는 단위 질량이 m_0 와 m_r 이고 공진 주파수가 ω_0 , ω_r 이며 ISRR 광자 모드와 magnon 모드를 각각 나타낸다. 두 개의 진동자는 결합 상수 k 에 의해 결합 되어진다. α 와 β 는 광자와 마그논 모드의 감쇠 상수를 나타낸다. 이러한 감쇠 상수는 광자 모드의 고유 손실과 마그논 모드의 길버트 감쇠를 모델링 하는데 사용된다. 이 시스템에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_1(x_1'' - 2\lambda x_1' - \omega_0 x_1) - m_2 k^2 \omega_r x_2^2 = 0 \quad (\text{II}, 12)$$

$$m_2(x_2'' - 2\lambda x_2' - \omega_0 x_2) - m_1 k^2 \omega_0 x_1^2 = 0 \quad (\text{II}, 13)$$

이 운동 방정식에 각 진동자의 변위를 $x_1(t) = A_1 \exp(i\omega t)$, $x_2(t) = A_2 \exp(i\omega t)$ 로 표현하면 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_1(-\omega^2 + \omega_0^2 + 2i\alpha\omega\omega_0)A_1 \exp(i\omega t)$$

$$-m_2 k^2 \omega_r^2 A_2 \exp(i\omega t) = 0 \quad (\text{II}, 14)$$

$$\begin{aligned} m_2(-\omega^2 + \omega_r^2 + 2i\beta\omega\omega_r)A_2 \exp(i\omega t) \\ -m_1 k^2 \omega_0^2 A_1 \exp(i\omega t) = 0 \end{aligned} \quad (\text{II}, 15)$$

이를 행렬식으로 표현하면 다음과 같은 2×2 행렬로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 + 2i\alpha\omega\omega_0 + \omega_0^2 & -\kappa^2\omega_r^2 \\ -\kappa^2\omega_0^2 & -\omega^2 + 2i\beta\omega\omega_r + \omega_r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 A_1 \\ m_2 A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II}, 16)$$

대각선 항은 광자 모드와 마그논 모드를 각각 모델링하는 조화 진동자 모델을 나타낸다. 비대각선은 두 모드 사이의 결합 항을 의미한다. 이 행렬식으로부터 결합 상수 $k=0$ 이면, 광자 모드 진동자는 $A_1=0$ 으로 관찰된다. 물리적 의미를 갖기 위해서는 진동자의 진폭에 해당하는 A 가 0이 아닌 값을 가져야 하므로 계수 항의 행렬인 $\det(\Omega)$ 는 0이 되어야 한다.

$$\det(\Omega) = (-\omega^2 + \omega_0^2 + 2i\alpha\omega\omega_0)(-\omega^2 + \omega_r^2 + 2i\beta\omega\omega_r) - k^4 \omega_0^2 \omega_r^2 = 0 \quad (\text{II}, 17)$$

공진 주파수 부근에서는 $\omega \cong \omega_0 \cong \omega_r$ 이 되고, 감쇠 상수가 $\alpha, \beta \ll 1$ 로 매우 작다고 가정하여 다음과 같이 식을 간단히 정리할 수 있다.

$$(\omega^2 - \omega_0^2)(\omega - \omega_0) - \frac{1}{2}\kappa^4\omega_0^3 = 0 \quad (\text{II}, 18)$$

이를 통해 두 진동자인 광자 ω_0 와 마그논 ω_r 사이에 결합에 의한 상호작용으로 기존의 모드와는 다른 새로운 2개의 혼성 모드가 발생한다.

$$\omega_{\pm} = \frac{1}{2} \left[(\omega_r + \omega_0) \pm \sqrt{(\omega_r - \omega_0)^2 + 2\kappa^4\omega_0^2} \right] \quad (\text{II}, 19)$$

2개의 모드는 f_+ , f_- 2개의 상부, 하부 branch 주파수를 형성하게 된다. 2개의 새로운 모드가 형성한 branch 주파수를 통해 광자 모드와 마그논 모드 사이의 결합 강도를 정량적으로 구할 수 있다 [43].

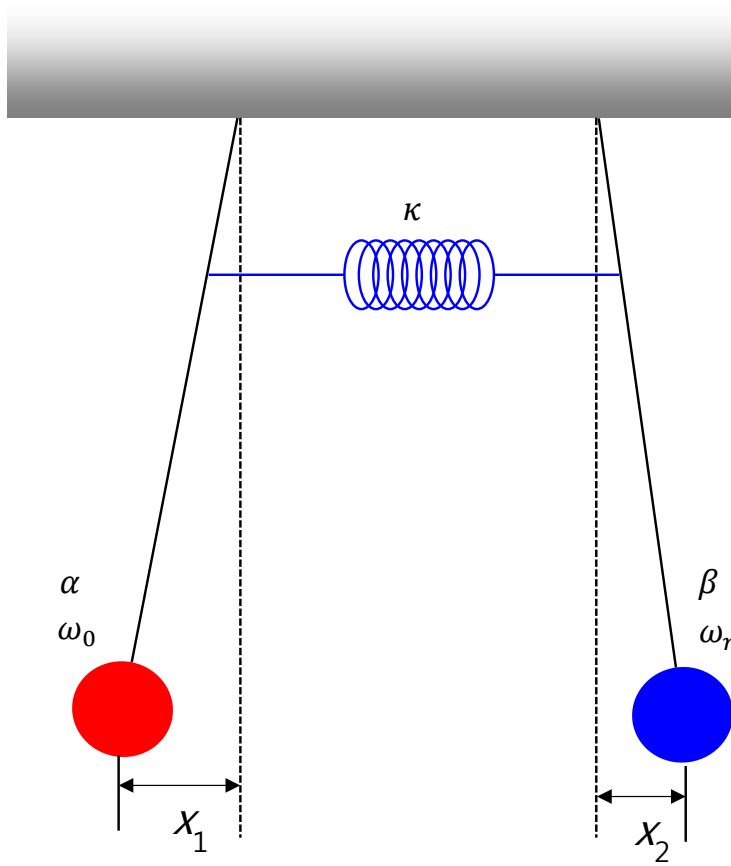
$$f_{\pm} = \frac{1}{2} \left[(f_r + f_0) \pm \sqrt{(f_r - f_0)^2 + \left(\frac{g_{\text{eff}}}{2\pi} \right)^2} \right] \quad (\text{II}, 20)$$

두 모드 사이의 결합 강도를 $\frac{g_{\text{eff}}}{2\pi}$ 로 정의하고 결합된 시스템의 상호작용 모드 간에 에너지가 전달 될 수 있는 결합 범위를 의미한다. 이 결합 범위는 주파수 단위로 측정된다. 결합 강도는 그림과 같이 상부와 하부 branch 사이의 길이의 반으로 정의한다. 결합 강도는 공진 주파수와 결합 상수 k 에 의해 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$2 \frac{g_{\text{eff}}}{2\pi} = k^2 f_0 \quad (\text{II}, 21)$$

$$k = 2 \left(\frac{g_{\text{eff}}}{2\pi} \right) \frac{1}{f_0} \quad (\text{II}, 22)$$

결합 상수 k 는 특정 주파수에서 두 모드가 결합 하는 동안 광자와 마그논 모드 사이의 정보를 교환하는 속도를 의미한다. 결합 강도가 증가할수록 교환되는 에너지의 속도와 양이 증가할 수 있음을 위의 식을 통해 확인할 수 있다[43].



<그림 5> 결합된 조화 진동자 모델. 광자 모드와 마그논 모드 각각의 진동자에 대해 공진 주파수 ω_0 , ω_r , 단위 질량 m_0 , m_r 감쇠 상수 α , β 의 물리적 성질을 가지고 있다. 두 모드 사이의 연결된 결합상수 k 는 에너지 전환되는 비율을 의미.

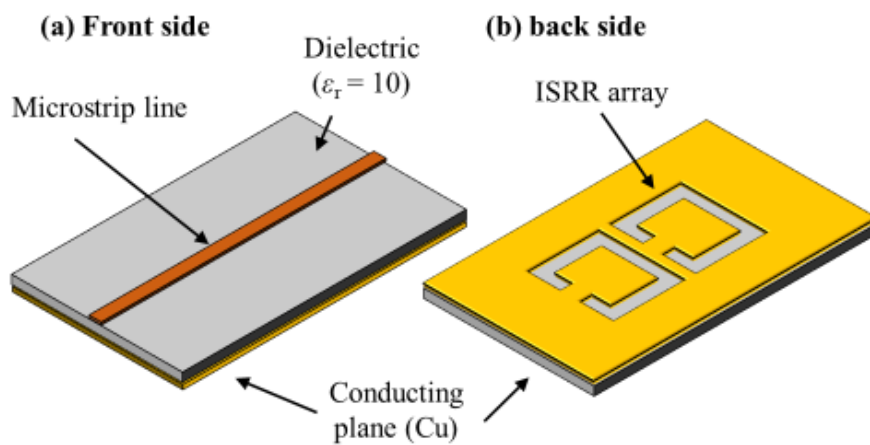
제 3 장

시편 제작 및 측정

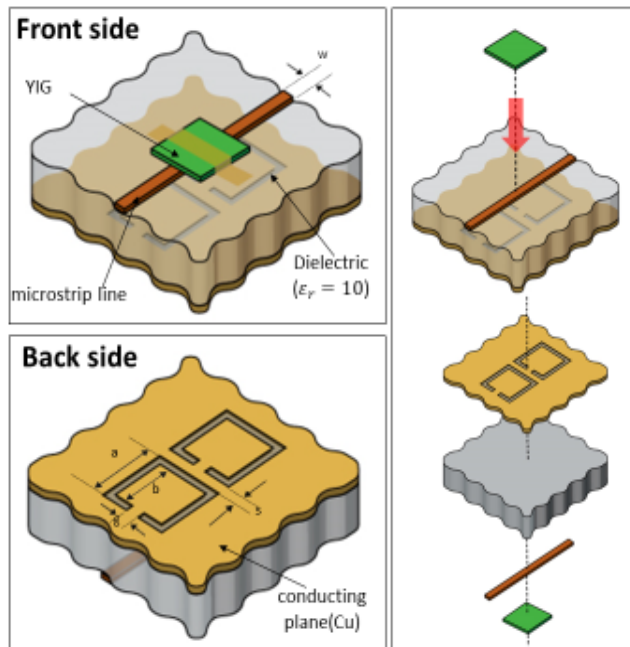
3.1 시편 구조 설계

전산모사를 이용하여 설계한 ISRR 1차원 배열을 다음 <그림 6>과 같은 구조로 제작하였다. Microstrip line, 유전체, ISRR이 놓인 접지면인 3중 구조로 된 표준 고주파 라미네이트 CER-10 RF 기판을 사용하였다. 상대 유전율(ϵ_r) 10, 10GHz에서 dissipation factor(소산 계수) 0.0012, 기판 높이 0.64mm, 구리 도전면 두께 35 μm 로 이루어진 기판을 기존 인쇄 회로 기판(PCB) 기술을 이용하여 제작하였다. 구리 접지면에 위치한 각 ISRR의 구조적 크기는 $a=5\text{mm}$, $b=3.8\text{mm}$, $g=0.4\text{mm}$ 로 정하였고, ISRR 사이의 거리는 0.4mm로 설계하였다. 마이크로 스트립 라인은 마이크로 스트립 계산 소프트웨어인 App-CAD를 이용하여 50 Ω 임피던스를 달성하기 위해 폭 0.57mm(w) 및 길이 40mm로 설정했다. 구리 접지면에 놓인 ISRR 1차원 배열의 개수를 2, 3, 4, 5개로 변화시켜 시편을 제작하였다. LPE 방법을 이용한 Gadolinium Gallium Garnet (GGG) 기판 상에 성장 된

3.7 mm × 3.7 mm × 25 μm의 에피택시 YIG 박막을 상업적으로 구매하여, 광자-마그논 결합 측정 시 하이브리드 구조로써 기판 앞면의 마이크로 스트립 라인 상부에 위치시켰다<그림 7>.



<그림 6> (a) 기판의 윗면은 microstirp line이 위치, (b) 하부 구리로 이루어진 접지면에 ISRR 1차원 배열 위치.



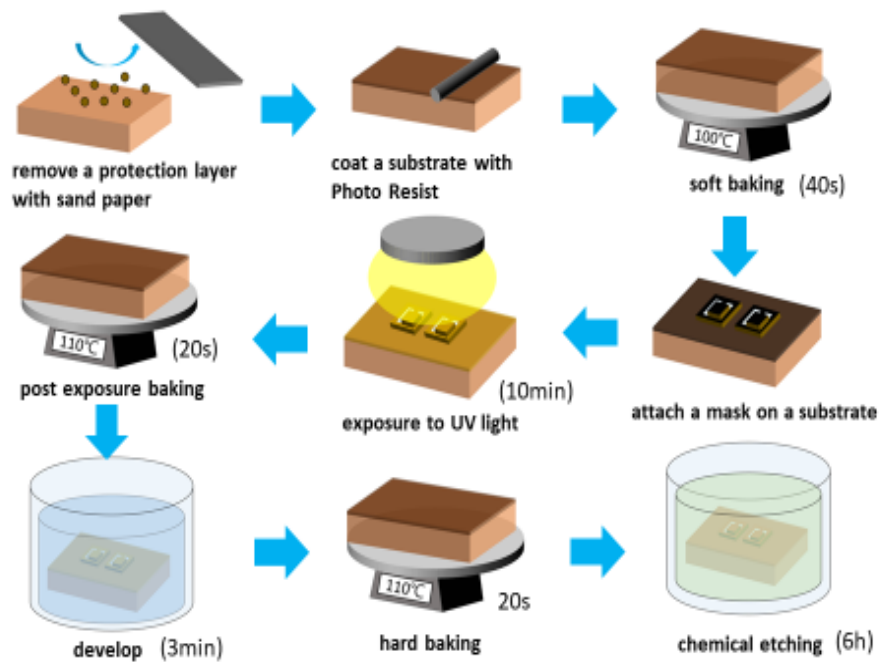
<그림 7> 기판의 전면, 후면 및 기판 3중 구조 모식도. 마이크로 스트립 라인 상부로 YIG가 접촉하여 평면 혼성 구조를 만든다.

3.2 광식각 공정 및 VNA 측정

<그림 8>과 같은 순서로 표준 노광 공정을 이용하여 기판의 접지면(하부)에 ISRR 1차원 배열 패턴을 형성하였다. 먼저, 투명한 OHP 필름에 레이저 인쇄 기술을 이용하여 UV 광원이 투과하지 않도록 ISRR 1차원 배열에 해당하는 마스크를 제작하였다. Positive photo resist GXR-601을 도포하였고 100℃, 40초 동안 soft baking을 통해 감광액을 부착시켰다. 마스크를 감광액 표면에 부착시키고 UV로 10분 접촉식 노광 공정을 수행하였다. 노광 후 패턴을 굳히기 위해 post exposure baking을 110℃, 20초 동안 실시하였다. 현상액에 3분 동안 현상 공정을 실시하여 빛과 반응한 부분을 제거하고 hard baking을 20초 동안 수행한다. 이와 동일한 공정 순서로 후면에 패턴을 형성하고 $FeCl_3$ 식각액을 이용하여 전면의 마이크로 스트립 라인과 구리 기판 접지면에 ISRR 1차원 배열 패턴을 식각한다.

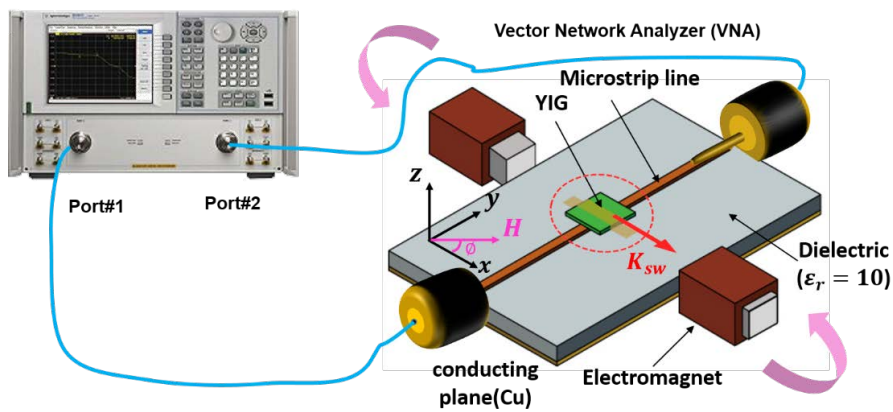
$|S_{21}|$ 스펙트럼을 측정하기 위해 보정된(calibrated) 2 포트 벡터 네트워크 분석기 (VNA, Agilent PNA 시리즈 E8362C)를 사용하였다. <그림 9>와 같이 마이크로 스트립 급전선의 입력과 출력은 VNA의 포트에 연결되었다. 정자기장은 마이크로 스트립 라인에 수직인 x 축을 따라 YIG 필름의 평면 상에 전자석을 사

용하여 인가되었다. $|S_{21}|$ 을 측정하는 동안 마이크로 스트립 라인에 흐르는 교류 전류의 마이크로파 주파수 f 와 정자기장 강도 H 를 변화시켰다. 마이크로 스트립 급전선을 통해 교류 전류가 흐를 때 수직 전기장에 의해 여기 되어 병렬 LC 공진 회로로 동작하여 공진을 일으킨다.



<그림 8> 샘플 제작을 위한 광식각 공정 순서도

S_{21} parameter measurement



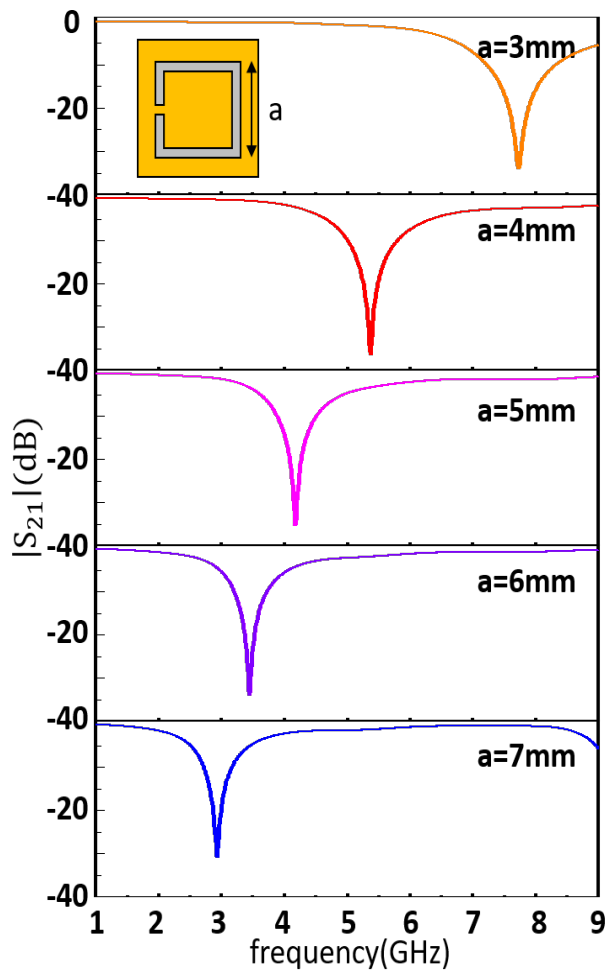
<그림 9> 2port Vector Network Analyzer 측정 모식도. 접지면에 ISRR 1차원 배열이 식각된 마이크로 스트립 라인 위에 YIG를 접착. 전자석을 이용하여 시간에 따라 변하는 정자기장 인가. 2개의 포트로 교류 전류의 마이크로파 주파수가 인가.

제 4 장

전산모사를 이용한 ISRR 공진 특성

4.1 ISRR의 변 길이 따른 공진 효과

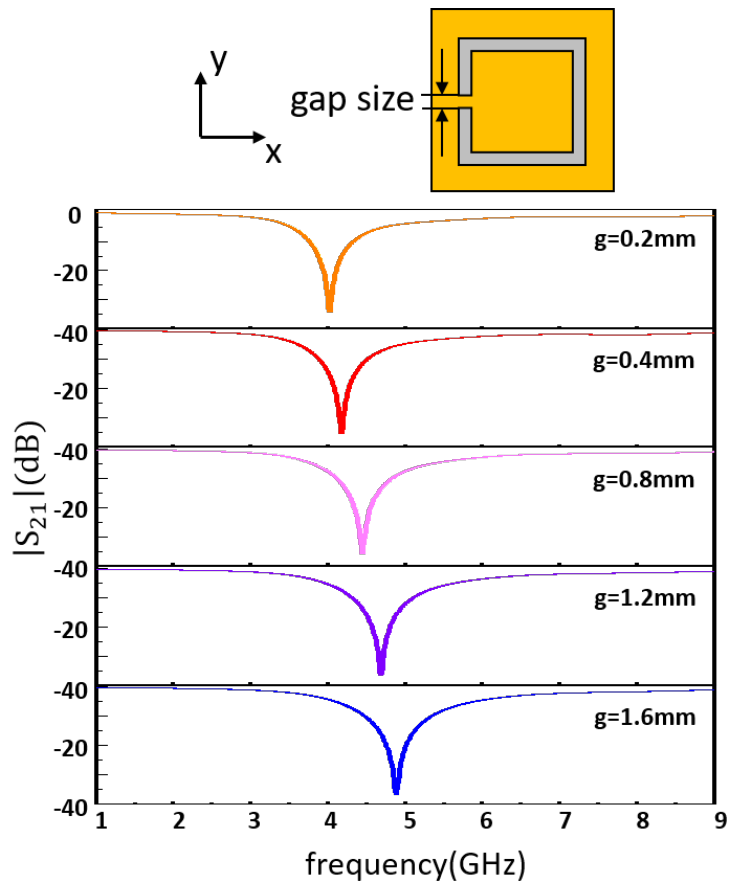
SRR의 기하학적 구조 변수에 의한 공진주파수 특성을 확인하였고, CST studio 소프트웨어를 이용하여 얻은 전산모사 결과를 바탕으로 설계를 수행하였다. 먼저 ISRR의 크기가 광자 모드에 미치는 영향을 관찰하기 위해 다른 변수들을 일정하게 설정하고 ISRR 외부 변의 길이를 3mm부터 7mm까지 변화해 가며 공진주파수를 관찰하였다. <그림 10>에 나타난 결과와 같이 ISRR의 길이가 증가할수록 공진주파수는 급격하게 감소하는 결과를 확인했다. ISRR에서 유전체 loop는 캐패시턴스($C = -\epsilon A/g$)의 역할을 하기 때문에 ISRR 크기가 증가할수록 유전체를 감싸는 도체 면적이 증가하게 되고 캐패시턴스 값은 감소하게 된다. 이로 인해 공진주파수($f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$)는 감소하는 특성을 보이게 된다.



<그림10> ISRR의 길이 변화에 따른 공진주파수 변화(링의 너비 값 고정)

4.2 ISRR의 분할 겹 너비에 따른 공진 효과

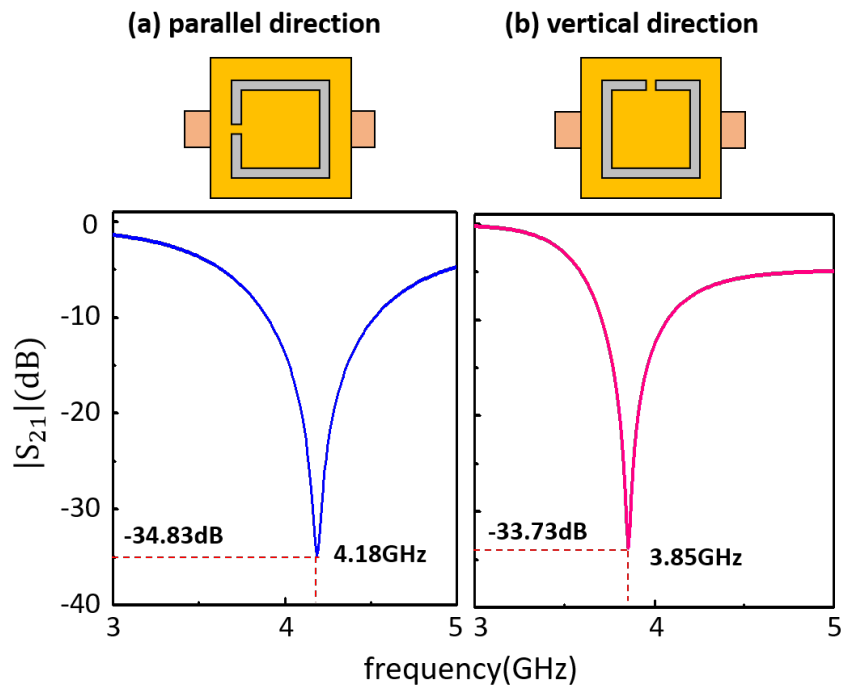
다음으로 <그림 11>과 같이 gap의 구조를 변화해가며 전산 모사를 수행하였다. 다른 변수들은 일정하게 설정하고 gap의 영향을 관찰하기 위해 gap의 간격을 0.2mm부터 1.6mm까지 변화해가며 공진주파수 결과를 확인하였다. gap의 간격이 증가할수록 광자 모드인 ISRR의 공진주파수는 고주파 영역으로 증가하였다. ISRR에서 split gap은 인덕터($L = -\frac{Nd\Phi_B}{dt} = -\frac{Nd(BA)}{dt}$)의 역할을 하기 때문에 gap 간격이 증가할수록 인덕턴스 특성은 증가하였다. 반면, 캐패시턴스($C = -\epsilon A/g$)는 도전체의 면적이 감소하므로 감소하게 된다. 인덕턴스보다 캐패시턴스 특성이 크게 발생하여 ISRR의 공진주파수는 증가하게 된다. 도전선의 역할로써 전류가 흐르는 gap이 존재하지 않으면 인덕턴스 특성이 발생하지 않는다. 그 결과, 인가된 전기장과 상호작용을 하지 않게 되어 광자 모드가 형성되지 않았다.



<그림 11> ISRR의 split gap에 의한 공진주파수 특성 변화. gap 간격이 증가할수록 공진주파수는 증가하는 결과를 보임.

4.3 ISRR의 분할 갭 방향에 따른 공진 효과

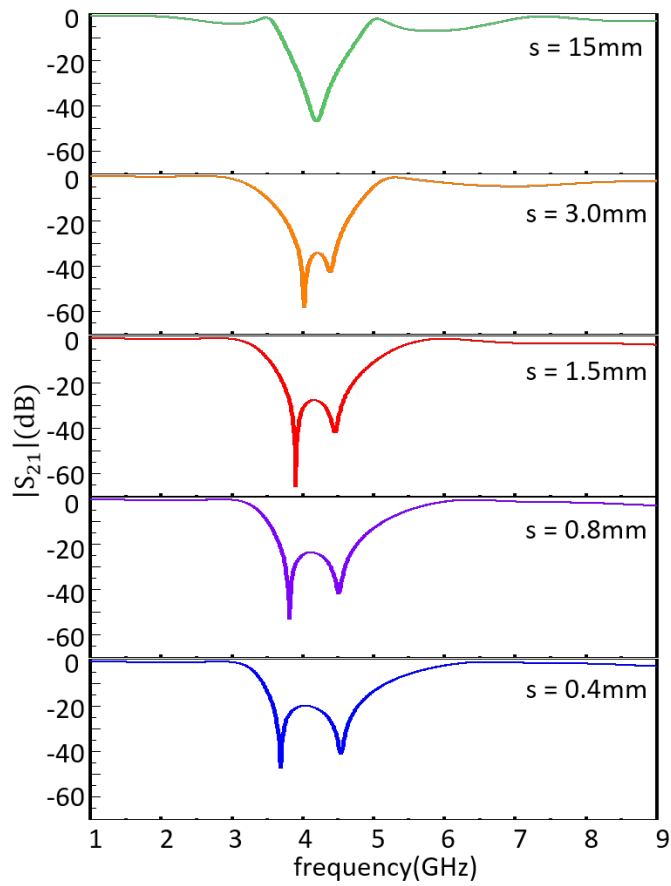
<그림 12>와 같이 ISRR의 갭(gap) 방향을 변화해가며 공진주파수 변화를 관찰하였다. 마이크로 스트립 라인을 기준으로 평행한 방향과 수직인 방향으로 전산모사를 수행하였고, 그림과 같은 결과를 얻었다. 마이크로 스트립 라인에 평행한 gap 방향이 수직인 방향에 비해 더 높은 공진주파수를 발생하게 된다. gap의 방향 변화는 포트와 gap 사이의 거리 차이로 인한 위상학적 차이를 지니게 된다. 마이크로 스트립 라인에서 발생한 전기장과 gap에서 발생하는 자기장의 동적 결합 세기 차이는 공진주파수 변화를 발생시킨다.



<그림 12> SRR gap 방향에 따른 공진주파수 특성 변화. (a) gap 이 마이크로 스트립 라인에 평행한 방향으로 배향된 경우의 공진 주파수. (b) gap이 마이크로 스트립 라인에 수직한 방향으로 배향 된 경우의 공진주파수.

4.4. 2개의 ISRR 사이 거리 변화에 따른 공진 효과

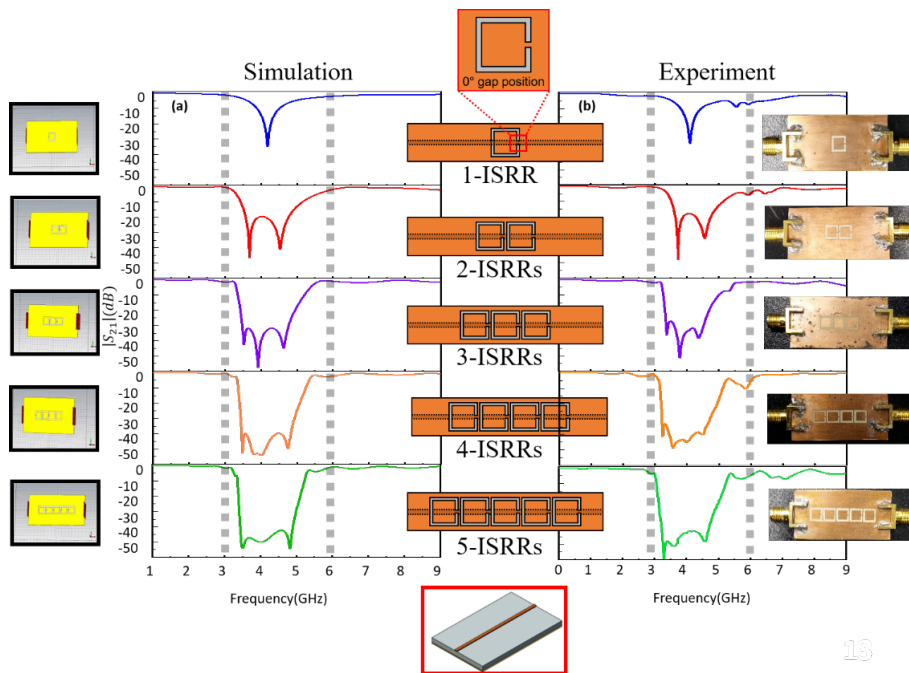
다음으로 두 개의 ISRR을 만들고 이웃한 ISRR 사이의 거리 (gap)를 0.4 mm에서부터 15 mm까지 변화시켜가며 1개의 ISRR과 어떤 차이가 있는지를 살펴보았다. 그 결과를 <그림 13>에 나타내었다. 하나의 ISRR과 비교해보았을 때 가장 큰 차이는 광 모드가 2개 발생한다. 또한 ISRR 사이 거리가 멀어질수록 두 개의 광 모드의 주파수가 서로 접근하는 동시에 $|S_{21}|$ 파라미터의 흡수 피크 세기가 점점 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이 결과를 통해 ISRR 사이의 거리가 충분히 멀어진다면 두 개의 광 모드가 하나의 ISRR의 광 모드의 주파수로 다시 합쳐질 것으로 예상할 수 있으며, ISRR 사이의 거리가 점점 멀어질수록 서로 독립적인 ISRR로 거동한다는 것을 알 수 있다. 이것은 반대로 ISRR 사이의 거리가 점점 줄어들수록 두 ISRR 사이의 광 모드 결합으로 인해 광 모드가 두 개로 분리된다는 것을 의미한다.



<그림 13> 2개의 ISRR 사이의 거리를 변화시키며 주파수와 $|S_{21}|$ 그래프를 전산모사를 통해 확인한 결과

4.5 ISRR 개수에 따른 공진 효과

다음으로 ISRR 사이의 거리를 0.4 mm로 일정하게 유지시킨 상태에서 <그림 14>와 같이 ISRR의 개수를 늘려가며 전산모사와 샘플 제작 및 측정을 수행하였다. <그림 14>에 나타난 결과에서 알 수 있듯 전산모사와 실험 결과가 서로 잘 일치하는 것을 확인하였다. 전산모사 및 실험 결과 모두 ISRR의 개수에 따라 $|S_{21}|$ 파라미터의 흡수 피크 세기가 점점 증가하였고, 이는 앞서 두 개의 ISRR의 결과와 같은 경향이었으며, 동시에 광 모드의 개수가 ISRR의 개수에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 주목할 만한 것은 ISRR의 개수 증가할수록 광 모드의 개수 뿐만 아니라 일정한 범위 내에서 주파수의 이득 및 대역폭이 증가한다는 것이다. 즉, 이 결과는 ISRR 배열의 개수가 증가할수록 마그논 모드와 더욱 효율적으로 다중 결합을 발생시킬 수 있다는 것을 의미한다. 본 결과를 통해 ISRR의 1차원 배열이 특정 대역폭 안에 존재하는 모든 마그논 모드의 신호를 고르게 증폭시키는 데 응용될 수 있을 것으로 기대된다.



<그림 14> ISRR 배열에 대한 전산모사와 실험 결과. (a) CST studio를 이용한 전산모사 결과 배열의 개수가 증가할수록 공진주파수 개수와 이득, 대역폭 증가. (b) 포토 리소그래피 공정을 통하여 제작한 ISRR에서 역시 전산모사와 유사한 결과를 얻음.

제 5 장

ISRR 1차원 배열 광자 모드와

YIG 마그논 모드 결합

5.1 2개의 ISRR 1차원 배열 광자 모드와 YIG 마그논 모드 결합

2개의 ISRR 1차원 배열과 YIG 박막 사이의 광자 마그논 결합의 하이브리드 구조를 보기 전에 각각의 독립적인 모드의 주파수와 $|S_{21}|$ 분산 관계 및 장기장 주파수 2차원 평면상에 $|S_{21}|$ 스펙트럼을 통해 공진 특성을 파악하였다.

<그림 15>은 YIG 박막 없이 ISRR 1차원 배열에서만 주파수와 $|S_{21}|$ 을 측정하였다. ISRR 1차원 배열의 순수한 광자 모드만이 $f_1 = 3.73$ GHz, $f_2 = 4.57$ GHz에서 나타났다. 광자 모드의 공진 주파수(에너지 흡수 피크)는 ISRR의 기학적 구조에 의한 인덕턴스와 캐패시턴스 크기에 의해서만 결정되기 때문에 자기장 세기에 따라 움직이지 않는다. 큰 이득을 가지는 광자 모드의 공진 주파수가 자기장에 영향 없이 존재한다.

<그림 16>은 자기장에 따른 마그논의 강자성 공명 (FMR) 모드로 ISRR 없이 YIG 박막에서만 별도로 측정되었다. <그림 16.(a)>가 보여주는 주파수와 $|S_{21}|$ 분산 관계에서 매우 작은 신호 세기의 FMR 모드가 자기장의 세기에 변한다. 피크 위치는 자화의 고유한 세차 운동이 자기장에 따라 달라지는 Kittel 방정식을 따르기 때문에 자기장이 증가할수록 고주파로 이동하게 된다. <그림 16.(b)>에서 나타낸 주파수와 자기장의 2차원 평면 관계에서 $|S_{21}|$ 스펙트럼으로 표현해 보았을 때 역시 자기장의 세기가 증가함에 따라 공진주파수가 Kittel 방정식을 만족하면서 거의 직선적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

2 개의 ISRR 1차원 배열과 YIG의 하이브리드 구조에서 공진 주파수 특성을 주파수와 $|S_{21}|$ 그래프 및 자기장과 주파수의 2차원 평면 상에 $|S_{21}|$ 스펙트럼을 통해 관찰 및 비교하였다. <그림 17>의 (a)에서 보여지는 바와 같이 ISRR과 YIG 박막의 하이브리드 구조에서는 2 개의 피크가 존재한다. 하늘색 화살표로 표시된 피크는 이득이 약하고 인가된 자기장 세기에 매우 강하게 의존한다. 이것은 자기장이 증가함에 따라 고주파로 연속적으로 이동하여 녹색 화살표를 교차하는 FMR 모드를 나타낸다. 녹색 피크는 상대적으로 높은 이득을 가지며 자기장의 세기에 상관없이 거의 움직이지 않으므로 ISRR 1차원 배열 모드를 나타낸다. 그림에서 보는 바

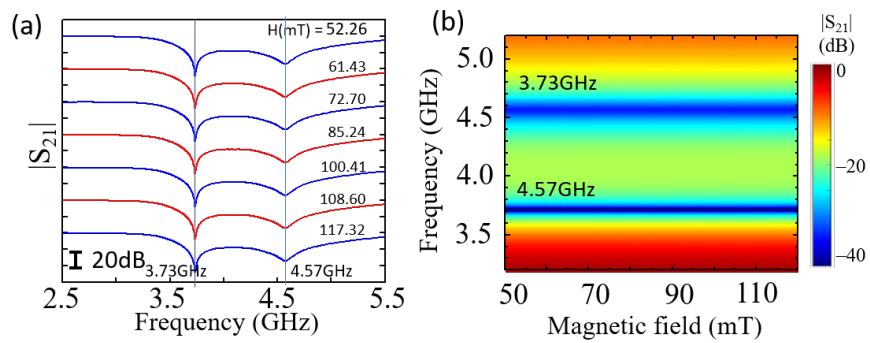
와 같이 YIG와 하이브리드 구조를 이루지 않은 단일 2개 ISRR 1차원 배열과 약간 다른 공진 주파수를 보이고 있다. 단일 ISRR 1차원 배열의 경우 $f_1 = 3.73$ GHz, $f_2 = 4.57$ GHz에서 공진 주파수가 형성되지만, 하이브리드 구조의 경우 $f_1 = 3.69$ GHz, $f_2 = 4.56$ GHz에서 공진 주파수가 발생한다. 이는 YIG와의 접촉을 통한 유전적 성질이 변화하여 약간의 공진 주파수가 변한 것으로 사료된다.

<그림 17.(b)>에서 나타난 녹색 피크의 60–80 mT, 90–110mT의 자기장 범위에서 멀리 떨어지게 되면, 하이브리드 시스템의 공진 주파수는 순수한 2개의 ISRR 1차원 배열의 광자 모드 공진 주파수와 매우 근접하게 된다. 그러나 해당 자기장 영역에 가까워지면 (f-H 스펙트럼의) 기울기는 YIG 박막의 FMR 주파수-H 스펙트럼의 측정 값과 유사하게 된다. 이것은 ISRR과 FMR 모드 사이에서 강력한 anti-crossing 효과가 존재한다는 것을 의미한다.

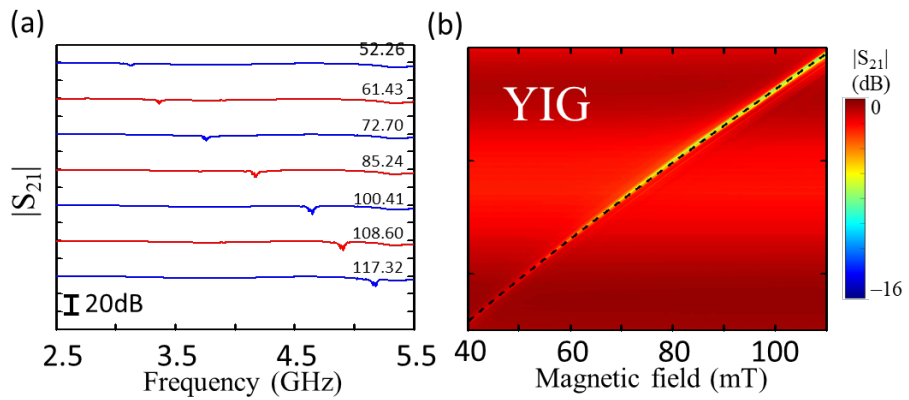
이와 같은 anti-crossing 효과가 발생하면서 매우 작은 신호 세기로 전파하던 마그논 모드는 포톤 모드와 상호작용으로 진폭의 세기가 극대화 된다. 좀 더 명확하게 anti-crossing의 거동을 보기 위해 <그림 18>과 같이 광자 모드의 공진 주파수 부근을 관찰해 보면 신호의 세기가 수십 배 증폭하는 것을 자세하게 확인할

수 있다. 즉, 다시 말해 2개의 ISRR 1차원 배열의 광자 모드와 YIG의 마그논 모드 사이에 강력한 결합으로 인해 에너지 교환이 일어났다는 것을 의미한다.

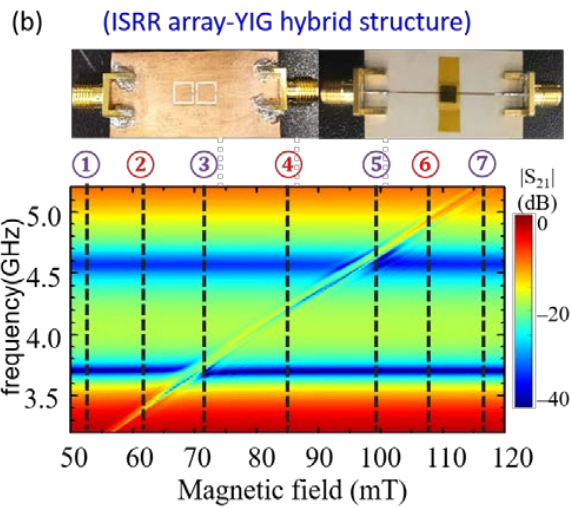
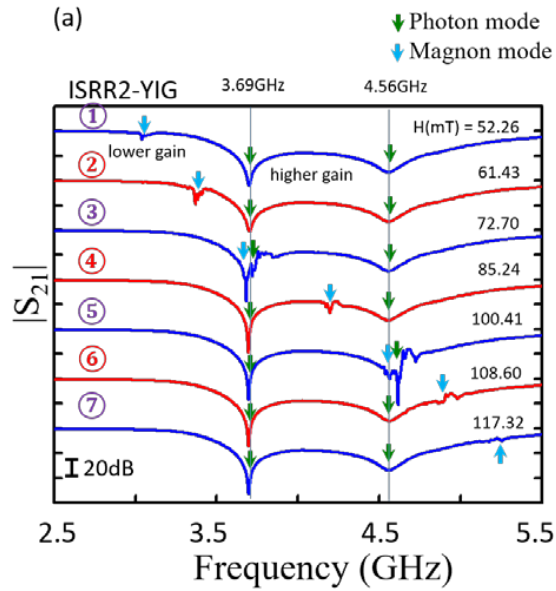
이 두 모드 사이에 에너지가 교환된 정도를 정량적으로 해석하기 위해 결합된 조화 진동자 모델을 사용하여 결합 강도 $g_{eff}/2\pi$ 를 예측 할 수 있다. <그림 19>에 나타난 빨간색의 광자 모드와 파란색의 마그논 모드가 교차하는 지점의 중심 주파수에서 결합에 의해 생성된 고주파와 저주파 branch 사이의 길이의 반을 결합 강도 $g_{eff}/2\pi$ 로 정의하였다. 모드 사이에 결합이 없으면 서로 교차하면서 어떤 현상도 일어나지 않지만, 강한 결합으로 인해 anti-crossing 현상이 관찰 됨으로써 두 모드 사이에 강한 결합이 존재함을 확인할 수 있었다. 그림과 같이 2개의 ISRR 1차원 배열의 공진주파수 3.69GHz에서 두 모드의 결합 강도는 70MHz로 에너지 교환된다는 사실을 확인하였다. 또 다른 공진주파수 4.56GHz에서는 두 모드의 결합 강도가 60MHz의 에너지가 교환됨을 확인할 수 있었다.



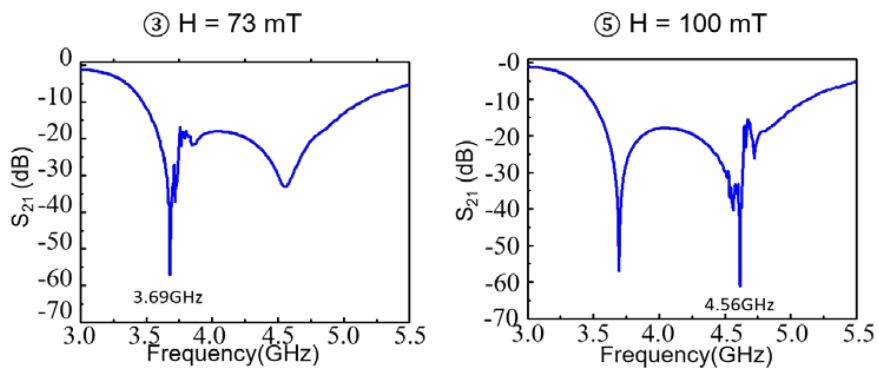
<그림 15> (a) 주파수와 $|S_{21}|$ 관계에서 2개의 ISRR 1차원 배열 광자 모드, L, C에 기인하는 구조적 공진 특성으로 자기장에 따라 변하지 않는다. (b) 자기장-주파수 2차원 평면 상에 $|S_{21}|$ 스펙트럼.



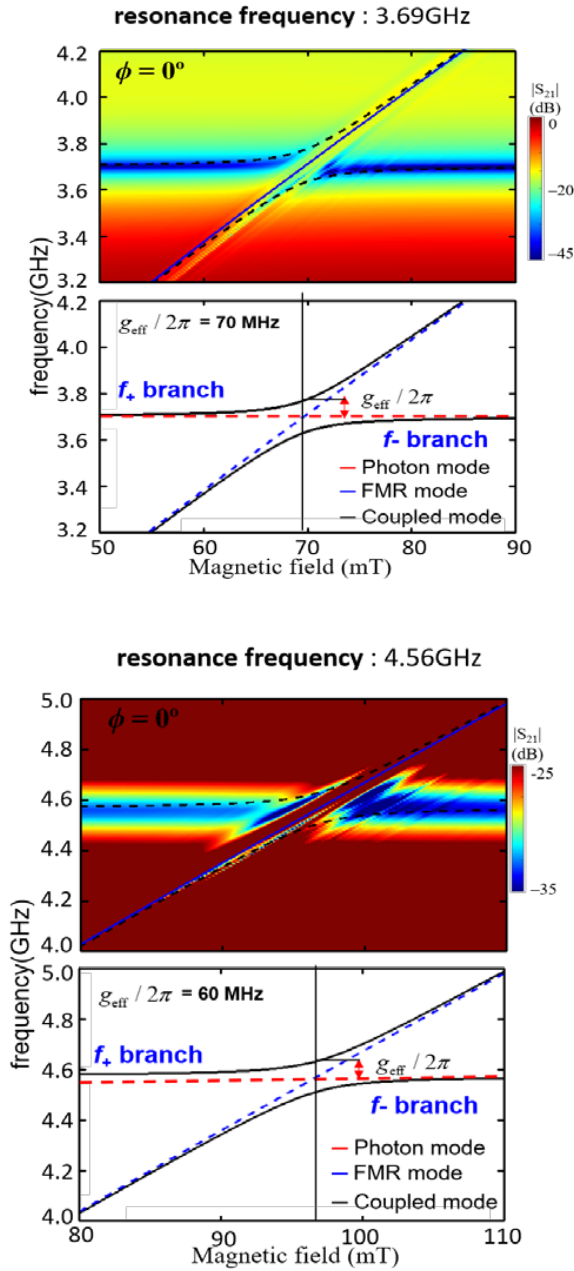
<그림 16> (a) 주파수와 $|S_{21}|$ 관계에서 YIG의 마그논 모드(FMR 모드), (b) 자기장-주파수 2차원 평면 상에 $|S_{21}|$ 스펙트럼, 자기장의 세기가 증가할수록 Kittel 방정식과 일치하는 공진 주파수 특성을 보인다.



<그림 17> 2개 ISRR 1차원 배열-YIG 하이브리드 구조. (a) 마그논 모드의 작은 세기 신호가 광자 모드와 상호작용을 통해 신호세기가 증폭된다. (b) 시편의 사진과 자기장-주파수 2차원 평면 상에 $|S_{21}|$ 스펙트럼



<그림 18> 2개의 ISRR 1차원 배열의 각 공진주파수 부근에서 광자와 마그논 결합에 대한 주파수- $|S_{21}|$ 그래프.



<그림 19> 2개의 ISRR 1차원 배열의 공진주파수 3.69GHz, 4.56GHz에서 anti-crossing 현상과 함께 결합 강도 70MHz, 60MHz 의 에너지 교환이 발생한다.

5.2 3개의 ISRR 1차원 배열 광자 모드와 YIG 마그논 모드 결합

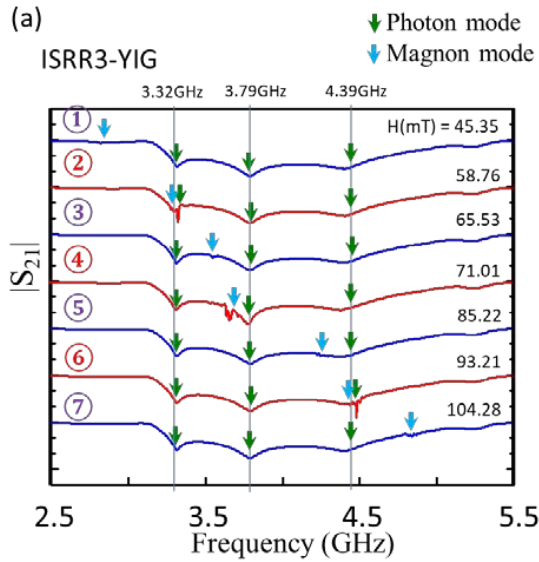
3개의 ISRR 1차원 배열 광자 모드 역시 2개의 ISRR 1차원 배열처럼 자기장에 의존하지 않는 거의 일정한 공진주파수를 갖는다. 그러나 ISRR 개수에 영향을 받는 공진주파수 특성상 2개의 ISRR 1차원 배열과 달리 3개의 광자 모드를 형성한다. 반대로 자기장에 영향을 받는 마그논의 강자성 공명 (FMR) 모드의 경우 주파수와 $|S_{21}|$ 분산 관계에서 자기장의 세기가 증가할수록 공진주파수가 증가하는 특성을 보인다. 피크 위치는 자화의 고유한 세차운동이 자기장에 따라 달라지는 Kittel 방정식을 따르기 때문에 자기장이 증가할수록 고주파로 이동하게 된다.

3개의 ISRR 1차원 배열과 YIG의 하이브리드 구조에서 공진주파수 특성을 주파수와 $|S_{21}|$ 그래프 및 자기장과 주파수의 2차원 평면 상에 $|S_{21}|$ 스펙트럼을 통해 관찰 및 비교하였다<그림 20>. 3개의 ISRR 1차원 배열과 YIG 박막의 하이브리드 구조에서는 4개의 피크가 존재한다. <그림 20.(a)>에서 하늘색 화살표로 표시된 피크는 이득이 약하고 인가된 자기장 세기에 매우 강하게 의존하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 자기장이 증가함에 따라 고주파로 연속적으로 이동하여 녹색 화살표를 교차하는 FMR 모드를

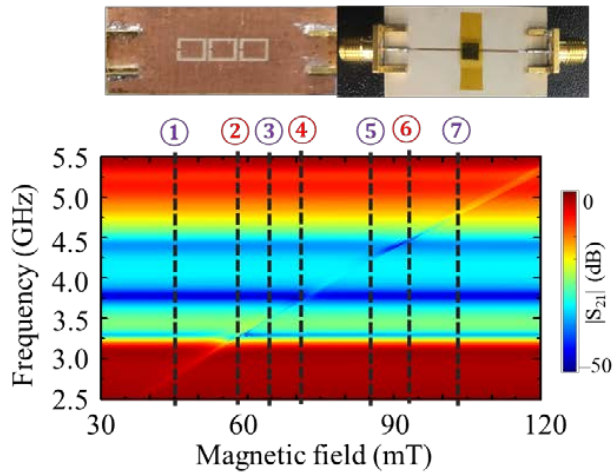
나타낸다. 녹색 피크는 상대적으로 높은 이득을 가지며 자기장의 세기에 상관없이 거의 움직이지 않으므로 3개의 ISRR 1차원 배열의 광자 모드를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 YIG와 하이브리드 구조를 이루지 않은 단일 3개 ISRR 1차원 배열과 약간 다른 공진 주파수를 보이고 있다. 단일 3개의 ISRR 1차원 배열의 경우 $f_1 = 3.38$ GHz, $f_2 = 3.79$ GHz, $f_3 = 4.38$ GHz 에서 공진 주파수가 형성되지만, 하이브리드 구조의 경우 $f_1 = 3.32$ GHz, $f_2 = 3.79$ GHz, $f_3 = 4.39$ GHz 에서 공진 주파수가 발생한다. <그림 20>의 (b)에서 보이는 바와 같이 녹색 피크의 60mT 부근과 70mT, 90mT 부근의 anti-crossing 영역 자기장 범위에서 멀리 벗어나게 되면, 하이브리드 시스템의 공진 주파수는 순수한 3개의 ISRR 1차원 배열의 광자 모드 공진 주파수와 매우 근접하게 된다. 그러나 해당 자기장 영역에 가까워지면 (f-H 스펙트럼의) 기울기는 YIG 박막의 FMR 주파수-H 스펙트럼의 측정 값과 유사하게 된다. 이것은 ISRR과 FMR 모드 사이에서 강력한 anti-crossing 효과가 존재한다는 것을 의미한다. 이와 같은 anti-crossing 효과가 발생하면서 매우 작은 신호 세기로 전파하던 마그논 모드는 포톤 모드와 상호작용으로 진폭의 세기가 증폭하게 된다. 역시 마찬가지로 anti-crossing의 거동을 자세하게 보기 위해 <그림 21>에 표현된 광자 모드의 공진 주파수 부근을 관찰해 보면 신호의 세기

가 수십 배 증폭하는 것을 관찰할 수 있다. 다시 말해 3개의 ISRR 1차원 배열의 광자 모드와 YIG의 마그논 모드 사이에 강력한 결합으로 인해 에너지 교환이 일어났음을 알 수 있다.

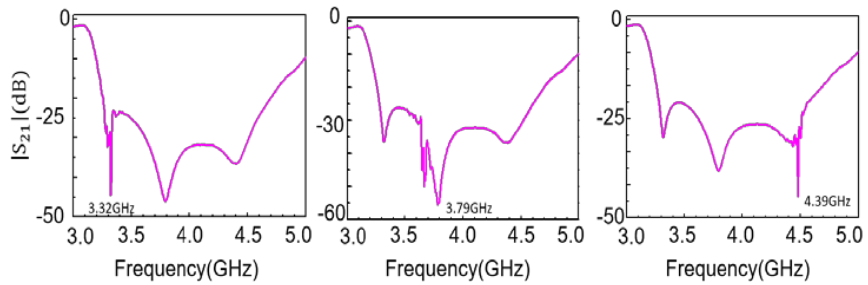
이 두 모드 사이에 에너지가 교환된 정도를 정량적으로 해석하기 위해 결합된 조화 진동자 모델을 사용하여 결합 강도 $g_{eff}/2\pi$ 를 예측 할 수 있다<그림 22>. 빨간색의 광자 모드와 검은색의 마그논 모드가 교차하는 지점의 중심 주파수에서 결합에 의해 생성된 고주파와 저주파 branch 사이의 길이의 반을 결합 강도를 측정하였다. 모드 사이에 결합이 없으면 서로 교차하면서 어떤 현상도 일어나지 않지만, 강한 결합으로 인해 anti-crossing 현상이 관찰 됨으로써 두 모드 사이에 강한 결합이 존재함을 확인할 수 있었다. 그림과 같이 3개의 ISRR 1차원 배열의 공진주파수 3.32GHz에서 두 모드의 결합 강도는 50MHz로 에너지 교환된다는 사실을 확인하였다. 또 다른 공진주파수 3.79GHz에서는 두 모드의 결합 강도가 54MHz의 에너지가 교환됨을 확인할 수 있었다. 마지막으로 4.39GHz에서 30MHz의 결합 강도가 측정되었다. 이는 2개의 ISRR 1차원 배열보다 더 많은 결합 횟수로 다중의 결합으로 인한 다중 에너지 교환이 일어났음을 의미한다.



(b) (ISRR array-YIG hybrid structure)

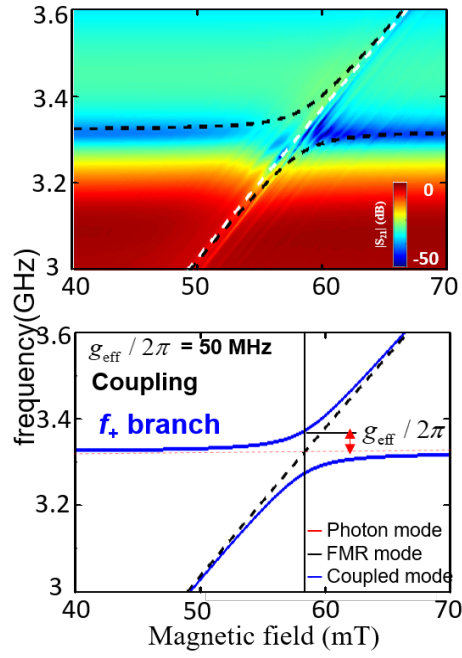


<그림 20> (a) 주파수와 $|S_{21}|$ 관계에서 3개의 ISRR 1차원 배열 광자 모드, L, C에 기인하는 구조적 공진 특성으로 자기장에 따라 변하지 않는다. (b) 자기장-주파수 2차원 평면 상에 $|S_{21}|$ 스펙트럼.

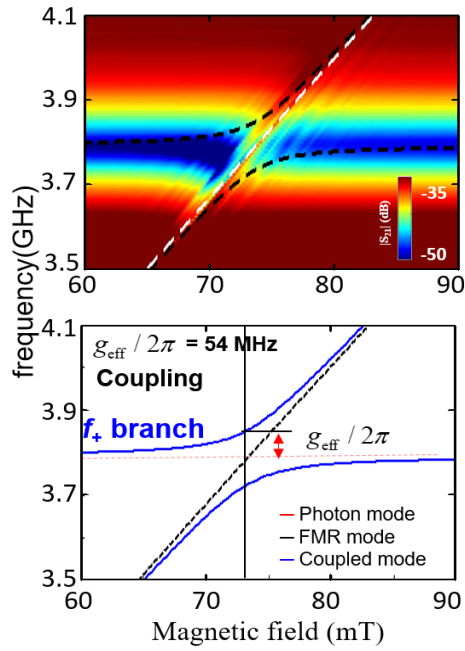


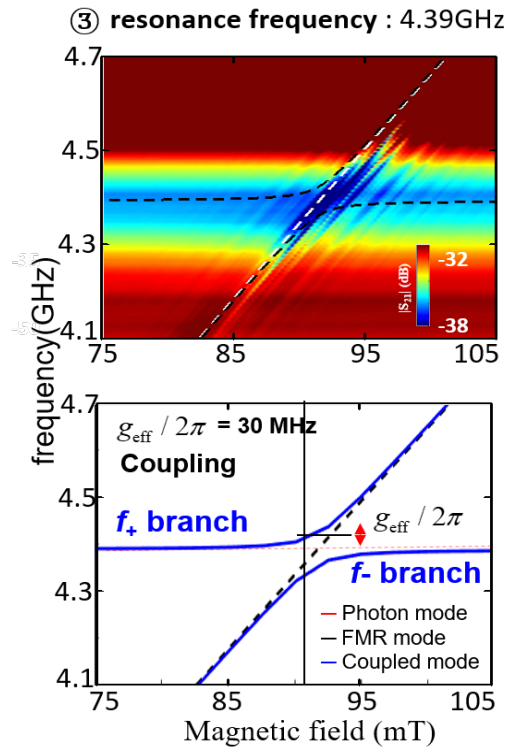
<그림 21> 3개의 ISRR 1차원 배열의 각 공진주파수 부근에서 광자와 마그논 결합에 대한 주파수- $|S_{21}|$ 그래프. 작은 세기의 마그논 신호가 공진주파수 부근에서 포톤 모드와 상호작용을 통해 증폭된다.

① resonance frequency : 3.32GHz



② resonance frequency : 3.79GHz





<그림 22> 3개의 ISRR 1차원 배열의 공진주파수 3.32GHz, 3.79GHz, 4.39GHz에서 anti-crossing 현상과 함께 결합 강도 50MHz, 540MHz, 30MHz의 에너지 교환이 발생한다.

5.3 4개의 ISRR 1차원 배열 광자 모드와 YIG 마그논 모드 결합

4 개의 ISRR 1차원 배열과 YIG의 하이브리드 구조에서 공진 주파수 특성을 주파수와 $|S_{21}|$ 그래프 및 자기장과 주파수의 2차원 평면 상에 $|S_{21}|$ 스펙트럼을 통해 관찰 및 비교하였다.

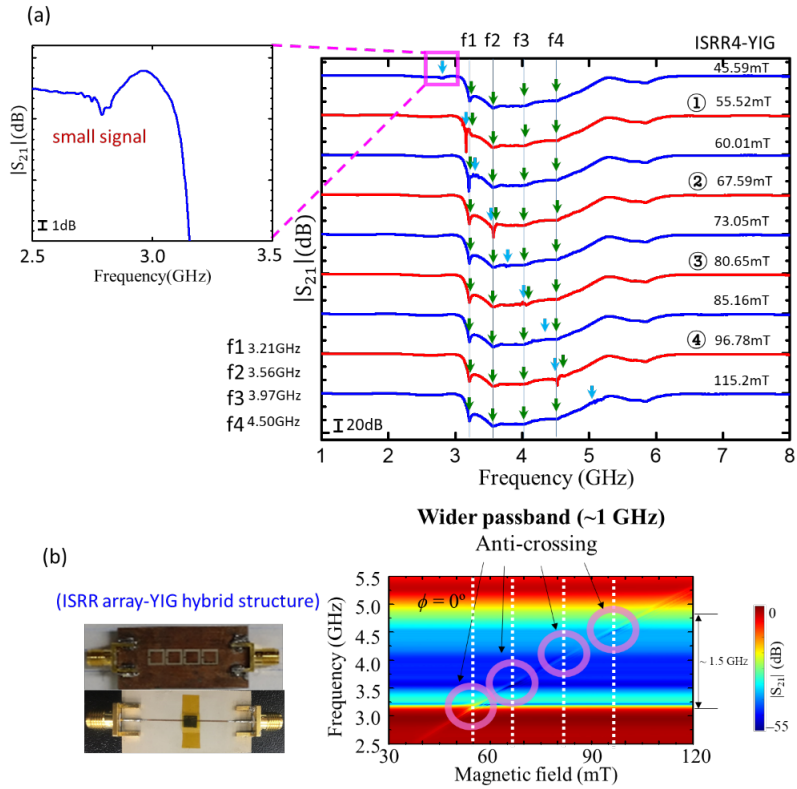
4개의 ISRR 1차원 배열과 YIG 박막의 하이브리드 구조에서는 <그림 23.(a)>에서 나타낸 것처럼 5 개의 피크가 존재한다. 4 개 ISRR 1차원 배열 모드가 4개의 공진 주파수를 가지기 때문이다. 하늘색 화살표로 표시된 피크 FMR 모드는 자기장이 증가함에 따라 고주파로 연속적으로 이동하여 녹색 화살표를 4번 교차한다. 녹색 피크는 상대적으로 높은 이득을 가지며 자기장의 세기에 상관없이 거의 움직이지 않으므로 4개의 ISRR 1차원 배열의 광자 모드를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 YIG와 하이브리드 구조를 이루지 않은 단일 3개 ISRR 1차원 배열과 약간 다른 공진 주파수를 보이고 있다. 단일 4개의 ISRR 1차원 배열의 경우 $f_1 = 3.24$ GHz, $f_2 = 3.57$ GHz, $f_3 = 3.97$ GHz, $f_4 = 4.47$ GHz에서 공진 주파수가 형성되지만, 하이브리드 구조의 경우 $f_1 = 3.21$ GHz, $f_2 = 3.56$ GHz, $f_3 = 3.97$ GHz, $f_4 = 4.50$ GHz에서 공진 주파수가 발생한다. <그림 23.(b)>에서 녹색 피크의 anti-crossing 영역 자

기장 범위에서 멀리 벗어나게 되면, 하이브리드 시스템의 공진 주파수는 순수한 4개의 ISRR 1차원 배열의 광자 모드 공진 주파수와 매우 근접하게 된다. 그러나 해당 자기장 영역에 가까워지면 (f-H 스펙트럼의) 기울기는 YIG 박막의 FMR 주파수-H 스펙트럼의 측정 값과 유사하게 된다. 이것은 ISRR과 FMR 모드 사이에서 강력한 anti-crossing 효과가 존재한다는 것을 의미한다.

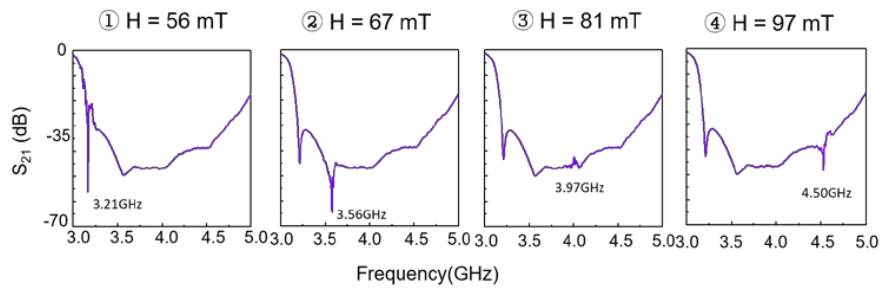
이와 같은 anti-crossing 효과가 발생하면서 매우 작은 신호 세기로 전파하던 마그논 모드는 포톤 모드와 상호작용으로 진폭의 세기가 증폭하게 된다. 역시 마찬가지로 anti-crossing의 거동을 자세하게 보기 위해 <그림 24>를 참고하여 광자 모드의 공진 주파수 부근을 관찰해 보면 신호의 세기가 수십 배 증폭하는 것을 관찰할 수 있다. 다시 말해 4개의 ISRR 1차원 배열의 광자 모드와 YIG의 마그논 모드 사이에 강력한 결합으로 인해 에너지 교환이 일어났음을 알 수 있다.

이 두 모드 사이에 에너지가 교환된 정도를 정량적으로 해석하기 위해 결합된 조화 진동자 모델을 사용하여 <그림 25>와 같이 결합 강도 $g_{eff}/2\pi$ 계산하였다. 빨간색의 광자 모드와 검은색의 마그논 모드가 교차하는 지점의 중심 주파수에서 결합에 의해 생성된 고주파와 저주파 branch 사이의 길이의 반을 결합 강도를 측정하였다. 모드 사이에 결합이 없으면 서로 교차하면서 어떤 현

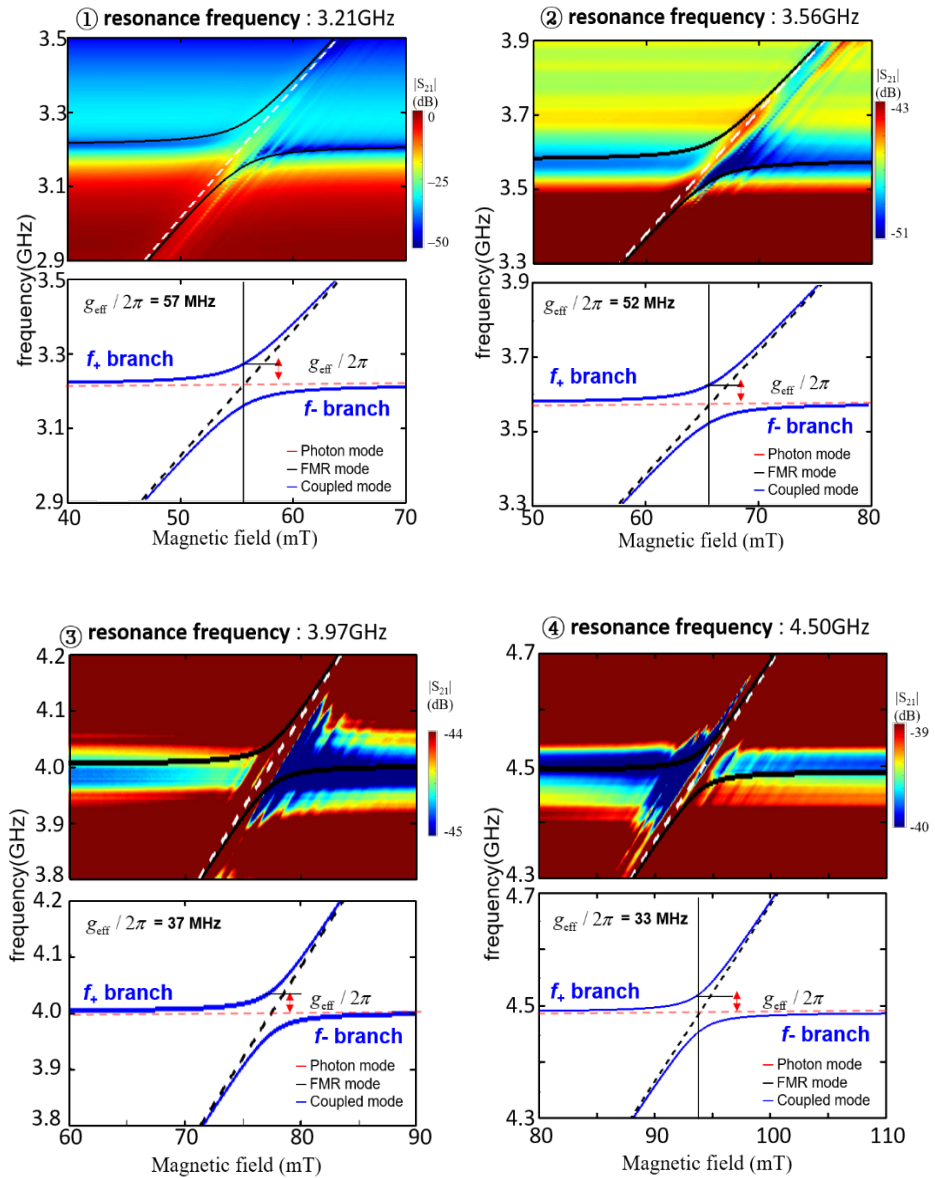
상도 일어나지 않지만, 강한 결합으로 인해 anti-crossing 현상이 관찰 됨으로써 두 모드 사이에 강한 결합이 존재함을 확인할 수 있었다. 그림의 경우 $f_1 = 3.21$ GHz, $f_2 = 3.56$ GHz, $f_3 = 3.97$ GHz, $f_4 = 4.50$ GHz에서 57MHz, 52 MHz, 37MHz, 33MHz 결합 강도가 측정되었다. 이는 2, 3개 ISRR 1차원 배열보다 더 많은 결합을 통해 다중 결합으로 인한 에너지 교환 정도가 증가했음을 확인했다.



<그림 23> (a) 주파수와 $|S_{21}|$ 관계에서 3개의 ISRR 1차원 배열 광자 모드, L, C에 기인하는 구조적 공진 특성으로 자기장에 따라 변하지 않는다. (b) 자기장-주파수 2차원 평면 상에 $|S_{21}|$ 스펙트럼.



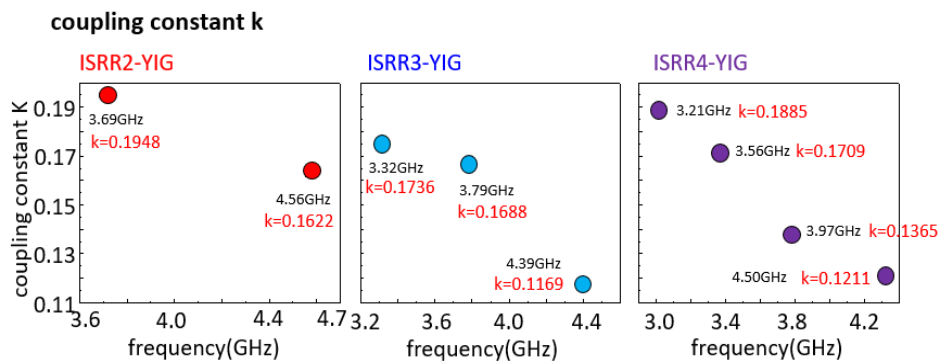
<그림 24> 4개의 ISRR 1차원 배열과 YIG 사이의 anti-crossing 효과가 일어난 부분에서 신호의 세기가 크게 증폭되는 것을 확인할 수 있다.



<그림 25> 4개의 ISRR 1차원 배열-YIG 사이의 결합 세기. 4개의 ISRR 1차원 배열의 각 공진주파수 부근에서 anti-crossing effect 발생 및 결합된 조화 진동자 모델에 의한 결합 세기 확인.

5.4 혼성 구조에서 ISRR 1차원 배열과 결합상수 k 관계

두 모드 사이의 결합되는 비율인 결합 상수 $k(\text{copper})$ 를 통해 ISRR 1차원 배열 내에서 광자-마그논 결합에 의한 에너지 교환 정도를 분석하였다. <그림 26>을 보면, 각 ISRR 1차원 배열에 대한 공진주파수에서의 결합 상수는 주파수가 커질수록 감소하는 특성을 보인다. 이는 결합 강도와 결합 상수 관계에서 공진 주파수의 영향이 크게 작용함을 의미한다. 또한, ISRR1차원 배열의 개수가 증가할수록 결합상수의 개수가 그에 상응하여 증가하고 있다. 이는 광자 모드와 마그논 모드의 결합의 횟수가 증가했음을 의미한다. 즉 두 모드의 결합의 증가로 에너지 교환이 일어날 경우는 더 높아진다. 다중의 포톤 마그논 결합을 통해 정보전달 소자로써 적용가능성을 확인할 수 있었다.



<그림 26> 각 ISRR 1차원 배열과 YIG사이의 주파수-결합상수 k
에 대한 그래프.

제 6 장

결 론

ISRR 1차원 배열을 가진 포톤 모드를 이용하여 YIG 마그논 모드와 다중의 강력한 결합을 발생시키는 연구를 하였다. 먼저, 기존의 3차원 형태의 cavity 공진기 대신 ISRR 1차원 배열을 마이크로 스트립 라인 기술에 적용함으로써 소형의 집적도 높은 2차원 평면 형상 공진기를 설계하였다. ISRR 1차원 배열의 주기적 성질로 인해 개별 포톤 모드가 상호작용을 하고, 이를 통해 높은 이득, 넓은 대역의 공진주파수 범위를 형성시킴으로써 마그논 모드와 고르게 다중으로 결합할 수 있는 조건을 충족하였다.

ISRR 1차원 배열 공진기와 YIG 박막의 하이브리드 구조를 통해 두 모드가 상호작용하는 다중의 anti-crossing 효과를 관찰하였다. 작은 세기의 마그논 신호가 넓은 주파수 대역에서 고르게 증폭되는 것을 확인하였고, 이를 통해 다중의 광자-마그논 결합이 발생하고 여러 번의 에너지 교환이 일어나는 것을 시연하였다. 이는 ISRR 배열의 개수에 따라 교환되는 에너지 정도를 제어할 수 있음을 의미한다. 본 연구는 ISRR 1차원 배열 광자 모드와 YIG FMR 모드 결합을 통해 일관된 양자 정보 전달 시스템 구현 가능성을 제시하였다.

- [1] A. Imamoglu, *Cavity QED based on collective magnetic dipole coupling : spin ensembles as hybrid two-level systems*, Physical Review Letters, **102**, 083602 (2009).
- [2] A. A. Serga, A. V. Chumak, and B. Hillebrands, *YIG magnonics*, Journal of Physics D : Applied Physics, **43**, 264002 (2010).
- [3] T. Ueda and M. Tsutsumi, *Left-handed transmission characteristics of rectangular waveguides periodically loaded with ferrite*, IEEE Transactions on Magnetics, **41**, 3532 (2005).
- [4] Y. He, et al., *Tunable negative index metamaterial using yttrium iron garnet*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **313**, 187 (2007).
- [5] E. L. Albuquerque and M. G. Cottam, *Polaritons in periodic and quasiperiodic structures*, Elsevier, (2004).
- [6] Y. Tabuchi, et al., *Hybridizing ferromagnetic magnons and microwave photons in the quantum limit*, Physical Review Letters, **113**, 083603 (2014).
- [7] X. Zhang, et al., *Strongly coupled magnons and cavity microwave photons*, Physical Review Letters, **113**,

156401 (2014).

- [8] O. O. Soykal and M. E. Flatte, *Strong field interactions between a nanomagnet and a photonic cavity*, Physical Review Letters, **104**, 077202 (2010).
- [9] C. Braggio, et al., *Optical Manipulation of a Magnon–Photon Hybrid System*, Physical Review Letters, **118**, 107205 (2017).
- [10] Y. Cao, et al., *Exchange magnon–polaritons in microwave cavities*, Physical Review B, **91**, (2015).
- [11] T. J. Silva, et al., *Inductive measurement of ultrafast magnetization dynamics in thin–film Permalloy*, Journal of Applied Physics, **85**, 7849 (1999).
- [12] I. S. Maksymov and M. Kostylev, *Broadband stripline ferromagnetic resonance spectroscopy of ferromagnetic films, multilayers and nanostructures*, Physica E : Low–dimensional Systems and Nanostructures, **69**, 253 (2015).
- [13] L. Kang, et al., *Magnetically tunable negative permeability metamaterial composed by split ring resonators and ferrite rods*, Optics express, **16**, 8825

(2008).

- [14] C. Luo, S. G. Johnson, and J. D. Joannopoulos, *All-angle negative refraction in a three-dimensionally periodic photonic crystal*, Applied Physics Letters, **81**, 2352 (2002).
- [15] A. W. Rodriguez, et al., *Frequency-selective near-field radiative heat transfer between photonic crystal slabs : a computational approach for arbitrary geometries and materials*, Physical Review Letters, **107**, 114302 (2011).
- [16] G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer, and P.C. Kremer, *Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **50**, 2702 (2002).
- [17] C. Caloz and T. Itoh, *Transmission Line Approach of Left-Handed (LH) Materials and Microstrip Implementation of an Artificial LH Transmission Line*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **52**, 1159 (2004).
- [18] R. Marques, et al., *Left-handed-media simulation and transmission of EM waves in subwavelength split-ring-*

- resonator-loaded metallic waveguides*, Physical Review Letters, **89**, 183901 (2002)..
- [19] J. Bonache, et al., *Application of Composite Right/Left Handed (CRLH) Transmission Lines based on Complementary Split Ring Resonators (CSRRs) to the Design of Dual-Band Microwave Components*, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, **18**, 524 (2008).
- [20] F. Martin, et al., *Split ring resonator-based left-handed coplanar waveguide*. Applied Physics Letters, **83**, 4652 (2003).
- [21] J. B. Pendry, et al., *Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena*. IEEE transactions on microwave theory and techniques, **47**, 2075 (1999).
- [22] A. A. Zharov, I. V. Shadrivov, and Y. S. Kivshar, *Nonlinear properties of left-handed metamaterials*, Physical Review Letters, **91**, 037401 (2003).
- [23] T. M. Grzegorzcyk and J. A. Kong, *Review of Left-Handed Metamaterials: Evolution from Theoretical and Numerical Studies to Potential Applications*, Journal of

- Electromagnetic Waves and Applications, **20**, 2053 (2012).
- [24] D. R. Smith, et al., *Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity*, Physical review letters, **84**, 4184 (2000)..
- [25] W. Cai and V. Shalaev, *Optical metamaterials : fundamentals and applications*, Springer Science & Business Media (2009)
- [26] F. Falcone, et al., *Effective negative- ϵ /stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators*, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, **14**, 280 (2004).
- [27] F. Falcone, et al., *Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials*. Physical Review Letters, **93**, 197401 (2004).
- [28] J. D. Baena, et al., *Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **53**, 1451 (2005).
- [29] F. AZNAR, et al., *Modelling metamaterial transmission*

- lines : a review and recent developments*, Opto-Electronics Review, **16**, 226 (2008),
- [30] B. Bhoi, et al., *Study of photon-magnon coupling in a YIG-film split-ring resonant system*, Journal of Applied Physics, **116**, 243906 (2014).
- [31] J. Garcia-Garcia, et al., *Miniaturized microstrip and CPW filters using coupled metamaterial resonators*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **54**, 2628 (2006).
- [32] J.-X. Niu and X.-L. Zhou, *A novel dual-band branch line coupler based on strip-shaped complementary split ring resonators*, Microwave and Optical Technology Letters, **49**, 2859 (2007).
- [33] M. A. Antoniadis and G. V. Eleftheriades, *A broadband series power divider using zero-degree metamaterial phase-shifting lines*, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, **15**, 808 (2005).
- [34] B. Bhoi, et al., *Robust magnon-photon coupling in a planar-geometry hybrid of inverted split-ring resonator and YIG film*. Scientific Reports, **7**, 11930 (2017).

- [35] T. L. Gilbert, *A Lagrangian formulation of the gyromagnetic equation of the magnetization field*. Physical Review, **100**, 1243 (1955).
- [36] B. Lax and K. J. Button, *Microwave ferrites and ferrimagnetics*, (1962).
- [37] C. Kittel, *On the Theory of Ferromagnetic Resonance Absorption*, Physical Review, **73**, 155 (1948).
- [38] Ü. Özgür, Y. Alivov, and H. Morkoç, *Microwave ferrites, part 1 : fundamental properties*, Journal of Materials Science : Materials in Electronics, **20**, 789 (2009).
- [39] P. Anderson, *Antiferromagnetism. Theory of superexchange interaction*. Physical Review, **79**, 350 (1950).
- [40] X. Wang, *Metallic Spintronic Devices*, CRC Press (2014).
- [41] X. Zhang, et al., *Superstrong coupling of thin film magnetostatic waves with microwave cavity*, Journal of Applied Physics, **119**, 023905 (2016).
- [42] X. Zhang, et al., *Strongly coupled magnons and cavity microwave photons*, Physical Review Letters, **113**, 156401 (2014).

- [43] M. Harder, et al., *Study of the cavity–magnon–polariton transmission line shape*, Science China Physics, Mechanics & Astronomy, **59**, 117511 (2016).

감사의 글

관악에서 2년 간의 석사과정을 마무리하며 소회와 감사를 표현하고자 이 글을 남깁니다.

먼저, 부족한 실력을 가진 저에게 믿음과 열정을 가지고 지도 해주신 김상국 지도 교수님께 감사드립니다. 물리에 대한 이해가 부족했던 저를 연구실에 받아주시고 연구할 수 있는 환경과 기회를 주셔서 새로운 분야에 도전할 수 있었습니다. 만족할 만한 결과를 가져가지 못하여 교수님의 기대에 미치지 못해 자신감이 떨어질 때가 많았는데, 연구에 대한 열정과 노력이 있다면 극복할 수 있다고 말씀해주셨기에 지금과 같은 결과 얻을 수 있었습니다. 논리적 사고를 키우게 도와주시고, 문제를 해결할 수 있는 관점과 방향을 제시 해주셔서 많이 성장할 수 있는 시간이었습니다. 바쁘신 와중에도 연구외적으로 항상 제자들과 교감하려고 노력하시고 신경 써 주셨는데 제가 그에 대한 마음을 받고 잘 표현하지 못한 것 같아 죄송하기도 하고 감사한 마음이 듭니다.

부족한 저의 연구를 심사 해주신 오규환 교수님과 이명규 교수님께도 감사드립니다. 학위 심사 중에 까다로운 질문으로 당황도 하고 어려움이 있었지만, 연구자는 당당한 태도로 자신의 연구성과

를 말할 수 있어야한다는 가르침을 주신 오규환 교수님께 감사의 마음 올립니다. 또한, 부족한 저에게 따뜻한 말로 위로해주시고 용기를 북돋아 주신 이명규 교수님께 감사드립니다. 교수님 덕분에 힘을 낼 수 있었습니다. 바쁘신 와중에도 저의 학위를 심사해주시고 졸업 허가해 주신 교수님들께 다시 한번 감사드립니다.

대학원 생활을 하면서 같이 힘든 시간 이겨내고 나누어준 연구원들에게 감사의 말 전합니다. 똑똑하고 일도 잘하는 영준이형, 무뚝뚝한 것 같지만 마음은 따뜻한 형 때문에 연구실이 삭막하지 않았던 것 같습니다. 형의 연구가 잘 풀리길 기원합니다. 범호 형 때문에 더 친근했던 민관이형, 가끔 측정실로 오셔서 위로 해주셔서 감사합니다. 갈수록 몸이 더 좋아지는 것 같아 보기 좋은 것 같습니다. 업적 업무를 같이 해주셨던 준회 형, 바쁘신 와중에도 꼼꼼하게 업무를 분담 해주셔서 형 덕분에 어려움 없이 할 수 있었습니다. 항상 일찍 오시고 열심히 연구하시는 모습을 보고 후배들에게 귀감이 되었던 것 같습니다. 랩장 업무와 개인 연구 둘 다 훌륭하게 해내고 있는 재학이의 모습을 보면서 책임감 있는 모습과 업무 능력을 많이 배웠습니다. 결혼 축하하고 행복하길 기원하겠습니다. 별로 친해질 기회가 없었지만 우수한 연구를 수행하고 있는 재혁이에게도 랩장으로서 수고하고 연구실을 잘 이끌어줘서 고맙다는 말 전하고 싶습니다.

성혁이 형, 용섭이에게도 고마움을 전합니다. 마음이 잘 맞는 성혁이 형이 없었다면 아마 심적으로 많이 힘들었을 겁니다. 도중에 포기하고 싶을 때 잡아줘서 여기까지 올 수 있었고, 힘들 때 위로해주고 말도 많이 들어주어서 감사합니다. 형이 있어서 연구실 생활도 나름 즐겁게 할 수 있었습니다. 착하고 성실한 용섭이, 항상 힘을 북돋아주면서 이해해주려고 하는 모습에 감사하고, 열심히 하는 모습에 자극을 받아 같이 열심히 할 수 있었습니다. 연구 외적으로 신경 써 주어서 고맙습니다.

동기인 신원, 제준, 현아 친구들에게도 고마운 마음 전합니다. 항상 긍정적이고 밝은 마음으로 기운을 주었던 신원, 엉뚱하지만 힘들 때 곁에서 공감해주려고 노력했던 제준, 장난도 잘 받아주고 이야기도 많이 나누고 잘 들어주었던 현아 모두 정말 감사합니다. 여러분이 있어서 힘든 연구실 생활 잘 극복할 수 있었습니다. 같이 들어와서 힘든 것도 즐거운 것도 나눌 수 있고 문제도 잘 해결할 수 있어서 행운이었습니다.

자주 측정실에 찾아와서 이야기를 건내며 안부를 물어주던 착한 종혁이, 까불거리지만 마음 따뜻한 해찬이, 밝고 성격 좋은 건희, 새벽이 아빠 규영이 모두 고맙고 하고 있는 연구 잘되어 무사히 졸업할 수 있길 바라겠습니다.

보히 박사님과 보성이형, 두 분께 정말 감사드린다는 말 전하고

싶습니다. 저에게 연구할 주제를 주시고 연구 진행에 도움을 주신
보히 박사님께 감사드립니다. 박사님께서 부족한 저에게 칭찬도
많이 해주시고 용기를 많이 주셔서 더욱 힘을 내어 연구를 할 수
있었습니다. 개인적으로 힘든 일이 있을 때 물어 보면서 걱정해주
고 신경 써 주시는 모습에 감동했고 감사했습니다. 그런 감사함을
표현하고자 제 나름대로 박사님 연구에 도움을 드리기 위해 조금
이나마 노력을 쏟았던 것 같습니다. 더 좋은 샘플 만들어드리고자
더 나은 측정결과를 드리고자 이렇게 미약하게나마 감사한 마음
을 표현하였던 것 같습니다. 그리고 보성이형, 항상 연구 내외적으
로 저에게 따뜻한 말, 때로는 따끔하게 조언 해주셔서 제가 대학
원 기간 동안 성장할 수 있었습니다. 처음에는 저에게 알려주시기
싫어하는 것 같고, 제가 귀찮게 하는 것 같아 어려워했는데 형의
연구자로서 가치관과 자세를 옆에서 지켜보고 느끼면서 도리어 저
에게 더욱 많은 도움이 된 것 같습니다. 옆에서 형의 연구 역량과
업무 수행을 보면서 진심으로 감탄할 때가 많았습니다. 저한테 많
은 자극과 동기부여가 되었습니다. 보성이형에게 감사하다는 말
꼭 전하고 싶습니다.

마지막으로 사랑하는 가족에게 감사합니다. 잘하는 것 없이 매번
걱정만 끼쳐드렸는데 믿어주시고 기다려주신 엄마, 아빠 감사합니
다. 그 마음에 보답하고자 더욱 노력했습니다. 저를 생각해주면서

걱정해주시고 응원해준 사랑하는 엄마, 아빠, 동생과 친척들에게
진심으로 감사드리며 이 논문을 바칩니다.

2018년 7월 26일 관악에서

장 승 훈